

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
Programa de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais –
PPG / BTRN**

**DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM
ECOSSISTEMAS DE FLORESTA SECUNDÁRIA SOBRE SOLOS
ANTRÓPICOS E SOLOS NÃO-ANTRÓPICOS (ADJACENTES) NA
AMAZÔNIA CENTRAL**

LUCERINA TRUJILLO CABRERA

Manaus, Amazonas
2009

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
Programa de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais –
PPG / BTRN**

**DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM
ECOSSISTEMAS DE FLORESTA SECUNDÁRIA SOBRE SOLOS
ANTRÓPICOS E SOLOS NÃO-ANTRÓPICOS (ADJACENTES) NA
AMAZÔNIA CENTRAL**

LUCERINA TRUJILLO CABRERA

Orientador : Dr. Flávio J. Luizão (INPA)

Co-orientador: Dr. Johannes Lehmann (Cornell University, USA)

Fonte Financiadora: National Science Foundation/ Cornell University/ ASSAI: Projeto “Carbon Cycling in Amazonian Forests as Affected by Black Carbon in Soil” e Projeto LBA.

Tese de doutorado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais do convênio INPA/UFAM, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Ecologia.

Manaus, Amazonas
2009

Tese aprovada, junto ao Curso de Pós-Graduação em Ecologia, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA

BANCA EXAMINADORA

Dra. Brigitte J. Feigl
USP – CENA

Dra. Dirse Clara Kern
Museu Emilio Goeldi

Dra. Elisa Wandelli
Embrapa- CPAA

Dr. Carlos E. Cerri
USP - CENA

Dr. Hedinaldo N. Lima
UFAM

Dr. Steel Vasconcelos
Embrapa - CPATU

Dr. Wenseslau G. Teixeira
Embrapa – CPAA

Manaus, 01 de outubro de 2009

Ficha catalográfica

T866 Trujillo Cabrera, Lucerina
Dinâmica da matéria orgânica do solo em ecossistemas de floresta secundária sobre solos antrópicos e solos não-antrópicos (adjacentes) na Amazônia central / Lucerina Trujillo Cabrera.--- Manaus: outubro, 2009. xv, 63 f. : il. color.

Tese (doutorado)-- INPA/UFAM, Manaus, 2009
Orientador : Flávio J. Luizão
Co-orientador : Johannes Lehmann
Área de concentração : Ecologia

1. Solos antrópicos – Amazônia. 2. Terra Preta do Índio – Amazônia.
3. Ciclagem do carbono. I. Título.

CDD 19. ed. 574.526404

Sinopse

Estudou-se a dinâmica do carbono e os principais fatores que controlam os processos de estocagem e mineralização do carbono em solos antrópicos e solos não-antrópicos (adjacentes), sob floresta secundária da Amazônia. O delineamento experimental foi de blocos inteiramente ao acaso, com cinco réplicas e três tratamentos: Terra Preta do Índio (TPI), solo de transição entre TPI-solo adjacente (ST) e solo adjacente (SA).

Palavras chaves: Terra Preta do Índio, ciclagem do carbono, floresta secundária, Amazônia central.

“ Ó, Senhor, quão variadas são as tuas obras! Todas as coisas as fizeste com sabedoria; cheia está a terra das tuas riquezas”

Salmos 105, 24

A Deus, amigo fiel e guia da minha vida,
Aos meus queridos pais Ezequiel e Lucerina, sempre em meu coração,
A meu esposo Jorge, o meu amor e companheiro,
Aos meus filhos Marcus e Daniel, bênçãos de Deus,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, que pelo seu amor e misericórdia me deu a vida, e permitiu a conclusão deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) e à Coordenação de Pesquisas em Ecologia (CPEC), pela oportunidade da realização deste curso de pós-graduação.

À CAPES, pela bolsa concedida.

Ao meu orientador, Dr. Flávio J. Luizão, pela sua amizade, confiança, apoio e pelas suas valiosas sugestões e idéias.

Ao meu co-orientador Dr. Johannes Lehmann, pela sua ajuda, pelo convite para treinamento em Cornell University, pela confiança e pelas suas valiosas sugestões.

Ao Projeto LBA, pelo apoio logístico durante as coletas das amostras no campo.

À National Science Foundation/ Cornell University, pelo apoio financeiro através do Projeto “Carbon Cycling in Amazonian Forests as Affected by Black Carbon in Soil”.

A Cornell University, pelo estágio como visitante, oferecido nessa instituição.

À ASSAI, pelo apoio com a administração financeira dos fundos utilizados para o desenvolvimento do projeto de tese.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), especialmente o Dr. Wenceslau Teixeira e Estevão que me ajudaram com as análises de carbono do solo.

A todos os pesquisadores professores do curso de Pós-graduação em Ecologia, pela ajuda e colaboração.

À Dra. Regina Luizão, pela colaboração durante o desenvolvimento do trabalho.

Às pessoas que fazem parte do Projeto LBA, especialmente à Erika, o Rubenildo, Ruth, Alexandre (in memoriam) e Fabrício, pela ajuda, amizade e colaboração.

Aos amigos do laboratório de solos e plantas do INPA, especialmente à Tânia, Edivaldo, Orlando, Jonas, Raimundo e Luan, pela colaboração nas análises laboratoriais.

Aos funcionários da secretaria da Coordenação de Pesquisas em Ecologia (CPEC), especialmente à Walmira, Lourival e Sr. João, pela colaboração.

À secretaria de pós-graduação em Ecologia, especialmente à Beverly e à Rosi, pela amizade e colaboração.

A os integrantes do projeto “Ciclagem do C na Terra Preta”, Pedro, Marcelo, Lidiane (In memorian), Jéssica, Rosângela, Veber e a Rubia, pela responsabilidade e colaboração.

Ao Giovanne Ribeiro pela ajuda na procura das áreas de estudo e demarcação das parcelas.

Ao Sr. Clécio, à Sra Francisca, ao Sr. José Ricardo (In memorian) e ao Sr João, por autorizar o desenvolvimento do trabalho de pesquisa nas suas propriedades particulares.

Ao J. Julio e à Romilda pela colaboração nas análises estatísticas e sugestões.

Aos meus colegas e amigos Jean, Rubem, Fabiane, Erick, Romilda, Terezinha, Cilene, Rejane, Thelma, Rejane e Suely, pela amizade, sugestões e colaboração.

A minha querida amiga Sandra Tapia, pela ajuda que me ofereceu quando mais estava precisando, pela amizade e colaboração.

Ao meu amor Jorge e à minha amiga Graça, pelo grande apoio e incentivo durante todo este tempo.

A todos aqueles que colaboraram e contribuíram na realização e conclusão deste trabalho de tese.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE APÊNDICES	xii
RESUMO GERAL	xiii
GENERAL ABSTRACT	xv
INTRODUÇÃO GERAL	16
MAPA DE LOCALIZAÇÃO GEOGRAFICA	18
CAPITULO 1: Estoque e frações da matéria orgânica em solos antropogênicos da Amazônia	19
Resumo	19
Introdução	20
Material e métodos	22
Área de estudo	22
Amostragem solo	24
Análises físico-químicas do solo.....	24
Análises estatísticas	26
Resultados	26
Estoque de carbono orgânico no solo.....	26
Carbono nas frações da MOS.....	27
Discussão	29
Estoque de carbono no solo.....	29
Carbono nas frações da MOS	30
Conclusões	31
Referências bibliográficas	32
CAPITULO 2: Dinâmica do carbono em solos antropogênicos de ecossistemas florestais	37
Resumo	37
Introdução	38
Material e métodos	38
Área de estudo e delineamento experimental	40
Amostragem de liteira e solo	42
Análises físicas	43
Análises bioquímicas	44
Análises química da liteira	45
Coefficiente de decomposição (k_L)	45
Efluxos de CO ₂ do solo	46

Mineralização de carbono do solo	46
Análises estatísticas	46
Resultados	47
Umidade e temperatura do solo	47
Produção e estoque de liteira	47
Entradas de carbono na liteira	50
Mineralização de carbono	51
Características bioquímicas do solo	52
Fatores controladores da dinâmica da M.O.S.	53
Discussão	56
Dinâmica da matéria orgânica	56
Fatores controlando a dinâmica da M.O.S.	59
Conclusões	61
Referências bibliográficas	62
Considerações finais	68
Apêndice	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Localização geográfica das cinco áreas de estudo: Rio Urubú, Rio Preto, Lago Grande, Encontro das Águas e Autaz Mirim, encontradas na Amazônia central	18
----------	--	----

CAPITULO I

Figura 2	Distribuição porcentual das frações da matéria orgânica do solo (%), até 40 cm de profundidade, nos solos de Terra Preta, solo de transição e solo adjacentes da Amazônia central	29
----------	---	----

CAPITULO II

Figura 1	Produção mensal de liteira (Mg ha^{-1}) e precipitação mensal (mm) nas áreas com solos de Terra Preta do Índio, solos de transição e solos adjacentes.	48
Figura 2	Estoques de liteira (Mg ha^{-1}) em diferentes meses do ano e estoque médio anual nos solos de Terra preta do Índio, solos de transição e solos adjacentes.	49
Figura 3	Mineralização acumulativa de carbono durante 35 dias de incubação nos solos Terra Preta, solo de transição e solo adjacente.	52
Figura 4	Gráfico das relações entre variáveis definidas pelo componente principal 1 (PC1) e o componente principal 2 (PC2).	55

LISTA DE TABELAS

CAPITULO I

Tabela 1	Atributos físico-químicos dos solos na camada 0-10 cm, em Terra Preta do Índio (TPI), solos de transição (ST) e solos adjacentes (SA) da Amazônia central.	23
Tabela 2	Estoques de carbono orgânico nas diferentes camadas do perfil do solo até 1 m de profundidade, em Terra Preta do Índio (TPI), solos de transição (ST) e solos adjacentes (SA) da Amazônia central.	27
Tabela 3	Teores de carbono (g kg^{-1}) nas frações da matéria orgânica do solo, até 40 cm de profundidade, nos diferentes solos estudados: TPI, ST e SA, seguido do desvio-padrão.	28

CAPITULO II

Tabela 1	Atributos físico-químicos dos solos na camda 0-10 cm, em Terra Preta do Índio (TPI), solos de transição (ST) e solos adjacentes (SA) da Amazônia central.	41
Tabela 2	Estoques de carbono orgânico nas diferentes camadas do perfil do solo até 1 m de profundidade, em Terra Preta do Índio (TPI), solos de transição (ST) e solos adjacentes (SA) da Amazônia central.	47
Tabela 3	Teores de carbono (g kg^{-1}) nas frações da matéria orgânica do solo, até 40 cm de profundidade, nos diferentes solos estudados: TPI, ST e SA, seguido do desvio-padrão.	49
Tabela 4	Entradas de carbono através da liteira fina nos diferentes componentes, em solos de TPI, ST e SA. Os valores são as médias de cinco réplicas, seguida dos desvios-padrão.	50
Tabela 5	Qualidade química de componentes da liteira, em solos de TPI, ST e SA. Os valores são as médias de cinco réplicas, seguida dos desvios-padrão.	51
Tabela 6	Características bioquímicas dos solos de Terra Preta do Índio, solos de transição e solos adjacentes nos diferentes períodos climáticos. Os valores são médias de cinco réplicas com seus desvios-padrão.	53
Tabela 7	Peso de cada variável nos diferentes componentes principais em Terra Preta, solo de transição e solo adjacente.	54

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 1	Precipitação mensal e anual (mm) de cada local de estudo.	69
Apêndice 2	Fotos de perfis de solo nas Terras Pretas, solos de transição e solos adjacentes nos locais de estudo, na Amazônia central.	70
Apêndice 3	Fotos de amostras de cerâmicas encontradas nas Terras Pretas do Índio, Rio Urubú, município de Rio Preto da Eva, Amazonas.	71
Apêndice 4	Fotos de florestas secundárias antigas utilizadas no estudo na área de Autaz Mirim (a), município de Careiro e Encontro das Águas (B), Manaus, Amazonas	72
Apêndice 5	Composição granulométrica e densidade do solo nos primeiros 10 cm de profundidade, nos diferentes locais e tipos de solo.	73
Apêndice 6	Médias das propriedades químicas do solo nos diferentes locais e tipos de solo.	74
Apêndice 7	Médias das variáveis medidas em cada local de estudo e tipo de solo.	75
Apêndice 8	Médias da qualidade da liteira e as entradas de carbono em cada local e tipo de solo.	76
Apêndice 9	Valores médios do estoque de carbono e o fracionamento da MOS em cada local de estudo.	77

RESUMO GERAL

As Terras Pretas do Índio são horizontes de solo caracterizados pelas altas quantidades de matéria orgânica estável, que foram estocadas nestes solos por centenas ou milhares de anos, mesmo sob condições edafoclimáticas tropicais, que normalmente favorecem a rápida mineralização do carbono (C) do solo. O entendimento da dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) e dos mecanismos de sua estabilização são essenciais para o estabelecimento de sistemas agro-ecológicos que favoreçam o seqüestro de C no solo, como uma alternativa para mitigar o aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Os objetivos deste estudo foram: 1) Comparar a dinâmica da matéria orgânica em solos antrópicos e solos não-antrópicos (adjacentes) da Amazônia Central, 2) Identificar os principais fatores que controlam a dinâmica da matéria orgânica e, 3) Determinar os estoques de carbono orgânico no solo, bem como a distribuição do C associado a cada fração física da matéria orgânica, nas Terras Pretas do Índio e solos adjacentes. O estudo foi realizado em cinco locais diferentes que apresentaram solos antrópicos sob floresta secundária de 20 a 30 de idade, localizados na Amazônia central. O delineamento experimental foi de blocos inteiramente ao acaso, localizados em cinco áreas distintas; cada bloco constituído por três tratamentos: Terra Preta do Índio (TPI), solo de transição entre TPI-solo adjacente (ST) e solo adjacente não-antrópico (SA). Cada tratamento foi estabelecido em parcelas de 1600 m², totalizando 15 pontos de amostragem. Amostras de solo e liteira foram avaliadas para estimar o C estocado no solo, na biomassa microbiana e na liteira, a proporção do C em cada fração física da matéria orgânica, a mineralização do C e os fluxos de CO₂. A dinâmica da matéria orgânica foi similar nos diferentes solos estudados, mostrando efeitos sazonais, com ciclagem mais rápida no período chuvoso do que no período seco. Porém, as TPI apresentaram biomassa microbiana 32 % maior do que nos SA, o que pode indicar que estes solos estejam beneficiando a população microbiana, tornando-se esta, uma importante estocadora de C lábil nestes sistemas. Em ambientes naturais de floresta secundária, os principais fatores que influenciaram a dinâmica da matéria orgânica nos três tipos de solos foram a sazonalidade, a temperatura e a textura do solo. Em condições controladas de temperatura e umidade (em experimentos de incubação de solo em laboratório), os fluxos de CO₂ foram menores nas TPI, indicando que outros fatores podem influenciar fortemente a atividade microbiana e os processos de decomposição da MOS nas TPI. As TPI apresentaram estoques de C 45% maiores do que nos SA, porém não houve evidências de acúmulo do C recente (liteira fresca) nestes

sistemas, e nem de que o C lábil estimule a decomposição do C estável. A maior proporção de C foi associada às frações mais finas, argila e silte, evidenciando a importância dos mecanismos de proteção física na estabilização do C. A aplicação dos princípios de estabilização do C das Terras Pretas do Índio para desenvolver novas Terras Pretas nos trópicos, apresenta importantes implicações na retenção de carbono no solo e na mitigação do efeito estufa.

GENERAL ABSTRACT

The Amazonian Dark Earths are characterized by high contents of stable organic matter which are stored in soil for hundreds or thousands of years, even under tropical edaphoclimatic conditions, which favor fast soil carbon (C) mineralization. Understanding the dynamics of this organic matter and the mechanisms of C stabilization are essential for the establishment of agro-ecological systems that foster C sequestration in the soil, as an alternative to mitigate the increase of CO₂ in the atmosphere. The objectives of this study were: i) to investigate the dynamics of organic matter in anthropic and adjacent soils; 2) to identify key factors that control the dynamic of organic matter, and 3) to determine the stocks of total-C in soil, as well as the stocks associated to each organic matter physical fraction in the Indian Dark Earth, adjacent soil and transition soil. The study was carried out in five different locations in central Amazonia, where anthropic soils under old secondary forest were located. The experimental design had randomized blocks with five replications and three treatments: Indian Dark Earth (TPI), the transition soil between TPI and adjacent soil (ST), and adjacent soil (SA). Soil and litter samples were evaluated for C stored in soil, in microbial biomass-C and in litter, the proportion of C in each fraction of soil organic matter, the mineralization of C, and the fluxes of soil CO₂. The organic matter dynamics was similar in different soils, showing seasonal effects, with faster cycling in the rainy season and slow than in the dry season. Higher amounts of microbial biomass were found in the TPI, which may indicate that these soils are benefiting the microbial population, which become an important storage pool of labile C these systems. In the natural environments of secondary forests, the main factors influencing the dynamics of soil organic matter (SOM) in the three soil types were the season, the temperature, and soil texture. However, under controlled temperature and moisture (in the incubation in laboratorial experiments), the SOM dynamics was slower in the TPI, indicating that other factors may strongly influence the processes of SOM decomposition in these soils. The TPI contains high stocks of humified C, but there was neither no evidence of accumulation of new C in these systems, no evidence that the presence of labile C stimulates the decomposition of stable soil C. The largest proportion of C was found in the fraction associated with the silt and clay, stressing the importance of the physical protection mechanisms in the stabilization of the C in soils. The application of the principles of C stabilization in the antropogenic Dark Earths to develop new dark earths in the tropics is an interesting alternative to sequester carbon in soils thus mitigating part of the CO₂ emissions to the atmosphere.

INTRODUÇÃO GERAL

A atual preocupação da sociedade com o aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, um dos principais gases do efeito estufa, e as possíveis mudanças no clima global, tem despertado o interesse em estudar a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS), os fatores que controlam os processos de estabilização do carbono no solo (Follet, 2007), e o potencial de sequestrar carbono nos diferentes ecossistemas (Schlesinger, 1999; Six et al., 2002). O solo representa o maior reservatório de C da superfície terrestre, estocando aproximadamente 1500 Pg de C até 1 m de profundidade; funciona como fonte ou sumidouro de CO₂ atmosférico (Lugo and Brown, 1993), dependendo da taxa de formação e decomposição da M.O.S. (Van Breemen and Feijtel, 1990). A acumulação do C no solo é obtida pelo balanço positivo entre as entradas e as saídas do C do estoque de matéria orgânica do solo, sendo esses processos controlados pelas condições ambientais e pelo uso do solo (Marschener, 2008).

A atuação dos microrganismos na decomposição da matéria orgânica resulta em transformações biogeoquímicas no ciclo global de carbono (Juma and McGill, 1986; Whitman et al., 1998) e dos nutrientes no solo. Os elementos mineralizados podem ser lixiviados no solo, aproveitados pelas plantas e microrganismos ou retidos na fração sólida. A matéria orgânica do solo pode ser dividida em fração lábil, de rápida ciclagem, e fração estável, de ciclagem muito lenta (Parton et al., 1987). As taxas de decomposição destas frações estão relacionadas com o conteúdo de materiais recalcitrantes do substrato, resistentes à decomposição microbiana (Anderson and Ingram, 1993; Moreira, 2007). O fracionamento da matéria orgânica se baseia no conceito de que os estoques da matéria orgânica do solo associados com partículas primárias inorgânicas de vários tamanhos, classes e composição mineralógica diferem em estrutura e função (diferentes graus de humificação); portanto, teriam diferentes funções na reciclagem da matéria orgânica (Christensen, 1992).

Nas regiões tropicais, a substituição de ecossistemas naturais por agrossistemas simplificados, favorecem as perdas de carbono do solo. Por tanto, práticas conservacionistas que contribuam para a fixação do C são necessárias para promover o sequestro de C no solo, aumentar a produtividade do solo, e ajudar na mitigação das mudanças climáticas. Neste contexto, as Terras Pretas do Índio da Amazônia (TPI) são importantes pelo elevado estoque de matéria orgânica estável, armazenada há milhares de anos. Existem evidências de que materiais carbonizados provenientes da combustão incompleta de resíduos orgânicos são os

responsáveis pela manutenção de altos níveis de matéria orgânica estável e nutrientes disponíveis nestes solos (Glaser, 1999; Glaser et al., 2000; Glaser et al., 2001b). A ocorrência de carvão e de fragmentos de cerâmica indica que a origem destes solos está ligada a processos antropogênicos (Denevan, 1996; Woods and McCann, 1999; Glaser et al., 2001). As áreas das Terras Pretas seriam antigas aldeias indígenas (Silveira, 2007). Provavelmente, os sedimentos acumulados sobre o solo aumentaram como resultado de ocupações repetitivas do local, dependendo do tempo de ocupação e a densidade de pessoas que habitaram o local (Woods, 1995), por populações pré-colombianas, 500 a 2500 anos atrás (Petersen et al., 2001; Neves et al., 2003).

O estudo da dinâmica da matéria orgânica nas TPI é importante para a quantificação do potencial para sequestrar carbono no solo; a dinâmica e os processos de estabilização da matéria orgânica são pouco conhecidos nestes sistemas. As TPI podem vir a ser um reservatório importante do CO₂ atmosférico, participando no seqüestro de C (Smidth e Noack, 2000) e, provavelmente, na redução da liberação de gases do efeito estufa para a atmosfera. No futuro, com o conhecimento dos processos de estabilização do carbono nas TPI e o surgimento de práticas de manejo que incentivem à acumulação de carbono no solo seguindo o princípio das TPI, não só seriam possíveis a recuperação de muitos solos inférteis das áreas degradadas da Amazônia, mas também a obtenção de um considerável aumento da produtividade destas terras, com manejo sustentável do solo, que beneficiariam grandemente à população amazônica, sem a necessidade de praticar novos desmatamentos de floresta primária. Este estudo teve como objetivos: 1) comparar a dinâmica da matéria orgânica em solos antrópicos (Terras Pretas do Índio) e solos não-antrópicos (adjacentes) da Amazônia central, 2) identificar os principais fatores que controlam a dinâmica do C e, 3) Determinar os estoques de carbono orgânico no solo, bem como a distribuição do C associado a cada fração da matéria orgânica, nas Terras Pretas do Índio e solos adjacentes.

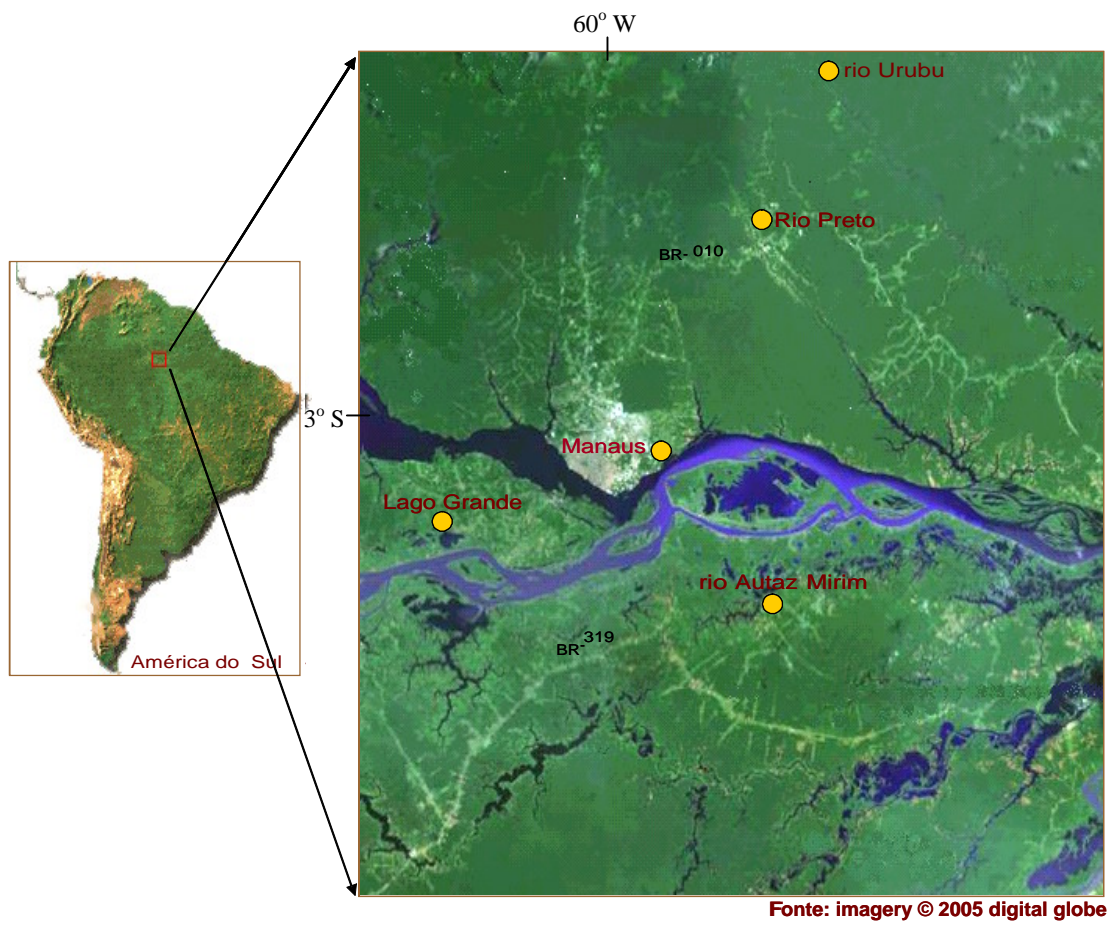


Figura 1. Localização geográfica das cinco áreas de estudo: Rio Urubú, Rio Preto, Lago Grande, Encontro das Águas e Autaz Mirim, encontradas na Amazônia central

CAPITULO I

ESTOQUE E FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLOS ANTRÓPICOS E SOLOS NÃO-ANTRÓPICOS (ADJACENTES) DA AMAZÔNIA CENTRAL

(Preparado de acordo com as normas da revista "Soil Science Society of America Journal")

RESUMO

As Terras Pretas do Índio são horizontes antrópicos que ocorrem sobre diversas classes de solo na Amazônia; contêm altas quantidades de matéria orgânica estável, podendo funcionar como sumidouros de carbono (C), importantes para diminuir as perdas de carbono na forma de CO₂ para a atmosfera, e contribuir na mitigação do efeito estufa. O entendimento dos processos de estabilização da matéria orgânica nestes solos é essencial para o estabelecimento de práticas de manejo que favoreçam a redução das emissões e o seqüestro de C em agrossistemas tropicais. O objetivo deste trabalho foi determinar os estoques de carbono orgânico no solo, bem como a distribuição do C associado a cada fração da matéria orgânica, nas Terras Pretas do Índio e solos adjacentes. O delineamento experimental foi de blocos inteiramente ao acaso, localizados em cinco áreas distintas; cada bloco constituído por três tratamentos: Solo antrópico (Terra Preta do Índio - TPI), solo de transição entre TPI-solo adjacente (ST) e solo não-antrópico (adjacente - SA), estabelecidos em parcelas de 1600 m², totalizando 15 pontos de amostragem. Foram feitos três perfis de solo até 1 m de profundidade para coletar amostras de solo nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-40, 40-70 e 70-100 cm. O carbono orgânico no solo e das frações da matéria orgânica foi determinado por combustão via seca em auto-analisador CHN. A densidade aparente do solo até 1 m de profundidade foi determinada utilizando anéis de Kopecky para calcular os estoques de carbono no solo. O estoque de carbono orgânico até 1 m de profundidade foi 45 % maior nas Terras Pretas do Índio e 19 % maior nos solos de transição do que nos solos adjacentes. Nos primeiros 40 cm da superfície do solo encontrou-se uma maior proporção de carbono orgânico nas frações mais finas, associadas a silte e argila, contribuindo na TPI com 73 % do total do C extraído, no ST com 71 % e no SA com 75%, indicando que a proteção física é um importante mecanismo de estabilização do C tanto nas TPI como nos SA.

INTRODUÇÃO

O aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera e seu potencial para alterar o clima do planeta tem resultado no interesse de estudar o sequestro de carbono e a capacidade que os diferentes ecossistemas têm para estocá-lo no solo (Schlesinger, 1999). A matéria orgânica do solo é considerada um importante reservatório de carbono que pode agir como sumidouro ou fonte de CO₂ atmosférico (Paul, 1984; Lugo and Brown, 1993), dependendo das taxas de acúmulo e decomposição da matéria orgânica (Van Breeman and Feijtel, 1990). Em ambientes tropicais, pluviosidade e temperaturas elevadas estimulam a atividade dos microrganismos, acelerando a mineralização da matéria orgânica (Tiessen et al., 1994; Zech et al., 1997).

A substituição de florestas naturais em agrossistemas favorece as perdas de carbono e a fertilidade, aumentando as emissões de CO₂ do solo para a atmosfera. Adubações com resíduos orgânicos são frequentemente usadas para aumentar a fertilidade do solo nestes sistemas, porém, a rápida ciclagem da matéria orgânica diminui sua eficiência para estocar o carbono no solo (Tiessen et al., 1994), somente uma pequena parte do carbono é estabilizada e estocada em longo prazo, em quanto que a maioria é continuamente liberada para a atmosfera na forma de CO₂ (Fearnside, 2000). Práticas conservacionistas que favoreçam o acúmulo de carbono no solo, são importantes alternativas para mitigar o aumento das emissões de CO₂ para atmosfera (Lal, 1997). Para isto é necessário tornar a ciclagem de carbono lenta e aumentar o tempo de permanência do carbono no solo (Jastrow, 2007).

Os métodos de fracionamento da matéria orgânica procuram separar frações quanto à natureza, à dinâmica e à função (Christensen, 2000), quantificando os estoques de carbono em compartimentos que a matéria orgânica possa estar associada, para mostrar os mecanismos da dinâmica da matéria orgânica e a sua estabilidade, em resposta às mudanças no estabelecimento de determinado sistema de manejo (Golchin et al., 1997; Six et al., 1998). A fração leve representa a matéria orgânica recente, não ligada a minerais e de rápida ciclagem, e a fração pesada é tida como material formando complexos organo-minerais: é a matéria orgânica de ciclagem lenta e estável (Marschner, 2008). Os compartimentos da matéria orgânica são dinâmicos, mutuamente dependentes e controlados por fatores climáticos, edáficos e antrópicos (Schlesinger, 1999). As taxas de decomposição destas frações estão também relacionadas com o conteúdo de materiais recalcitrantes no substrato (Anderson and Ingram, 1993).

Os solos de Terra Preta do Índio da Amazônia, estocam grandes quantidades de matéria orgânica mantidas há vários séculos, mesmo nas condições edafoclimáticas existentes na região. Glaser et al., 2000, encontraram altos estoques de carbono nas Terras Pretas, quando comparados aos dos solos adjacentes não-antrópicos. A ocorrência de carvão vegetal nas Terras Pretas possivelmente é o fator chave para a manutenção da matéria orgânica altamente estável (Sombroek, 1966; Glaser, 1999; Glaser, 2000), pois a maioria das TPI contém aproximadamente 35% de carvão, teor significativamente maior do que nos solos adjacentes não-antrópicos. A presença de carvão e fragmentos de cerâmica indica que a origem das Terras Pretas está ligada a processos antropogênicos (Denevan, 1996; Woods and McCann, 1999; Glaser et al., 2001); estes locais seriam antigas aldeias indígenas (Silveira, 2007).

Todas as formas de carvão apresentam alta aromaticidade e recalcitrância que leva à sua acumulação no solo (Seiler and Crutzen, 1980; Skjemstad et al., 1996) ou ao seu transporte nos sedimentos dos rios (Mitra et al., 2002) e deposição nos sedimentos marinhos (Masiello and Druffel, 1998). Os anéis aromáticos policíclicos contidos no carvão são abundantes e, contêm grande quantidade de pequenos poros, tornando o carvão inacessível para os microrganismos, o que dificulta a degradação microbiana da MOS (Smith and Noack, 2000). Por outro lado, substâncias orgânicas dissolvidas são frequentemente adsorvidas pelo carvão devido à hidrofobicidade dos materiais orgânicos (Gustafsson et al., 1997; Braida et al., 2003). A presença de carvão pode ter um maior impacto sobre a composição e reciclagem da matéria orgânica, especialmente em áreas de floresta tropical e savanas (Fearnside, 1985; Sanford et al., 1985), mas ainda faltam pesquisas sobre os efeitos do carvão na dinâmica da MOS.

As Terras Pretas do Índio podem representar um reservatório importante do CO₂ atmosférico, participando significativamente no sequestro global de C (Smith and Noack, 2000) e, provavelmente, na redução da emissão de gases do efeito estufa para atmosfera. No futuro, com o conhecimento dos processos de estabilização do carbono nas TPI e o surgimento de práticas de manejo que incentivem à acumulação de carbono no solo seguindo o princípio das TPI, não só seriam possíveis a recuperação de muitos solos inférteis das áreas degradadas da Amazônia, mas também a obtenção de um considerável aumento da produtividade destas terras, com manejo sustentável do solo, que beneficiariam grandemente à população amazônica, sem a necessidade de praticar novos desmatamentos de floresta primária. Este estudo procura quantificar o carbono orgânico estocado no solo, assim como o

carbono associado a cada fração da matéria orgânica, em solos de Terra Preta do Índio, solos de transição e solos adjacentes.

MATERIAL E MÉTODOS

Áreas de estudo

O estudo foi realizado em cinco áreas: Encontro das Águas (EA), Lago Grande (LG), Rio Preto da Eva (RP), Rio Urubu (URU) e Autaz Mirim (AUT), próximas de Manaus, Amazonas, Brasil. O clima da região é tropical úmido e quente, com precipitação média anual de 2500 mm, temperatura média anual de 24 a 26 °C e umidade relativa do ar de 80 a 93%. O solo predominante na região é classificado como Latossolo Amarelo distrófico álico (Oxisol), com alto teor de argila (> 60%), baixos níveis de nutrientes e pH muito ácido (Teixeira & Bastos, 1989).

Os solos com horizontes antrópicos (Terras Pretas do Índio) são solos formados por populações pré-colombianas 500 a 2500 anos atrás (Heckenberger et al., 1999; Neves et al., 2003), apresentam coloração escura, com presença de cerâmicas e carvão, elevados estoques de matéria orgânica estável e nutrientes, especialmente o fósforo (Tabela 1), Ca, Mg, Zn e Mn, ocorrendo sobre Latossolos (oxissolos), Argissolos (Ultissolos), Cambissolos (Inceptissolos) ou Espodossolos (podzóis), formando um horizonte A antrópico (Smith, 1980, Andrade, 1986). Geralmente ocorrem em áreas com pequenas manchas até 90 ha (Smith, 1980; Donatti, 2003), e apresentam um horizonte A antrópico de 40 a 150 m de profundidade (Neves et al., 2003).

Os solos de transição, denominados por Sombroek, (1966) de “Terras Mulatas”, são solos de coloração marron, localizados em áreas próximas às Terras Pretas, com pouca ou nenhuma cerâmica, horizonte A antrópico menos profundo, menor quantidade de carvão e menor quantidade de C e nutrientes, quando comparadas com as Terras Pretas (Kämpf, et al., 2003). Acredita-se que estas áreas com solos de transição foram usadas para o estabelecimento de cultivos de longa permanência, próximas às aldeias indígenas, sendo mantidas pela adição de resíduos orgânicos (Sombroek, 1966; Denevan, 1996).

Os solos não-antrópicos (adjacentes), são áreas próximas aos solos de transição, onde o solo é o original, sem manipulação antrópica ou acumulação de matéria orgânica estável nos horizontes superficiais. Geralmente, os solos adjacentes utilizados neste estudo foram da classe dos Latossolos, Espodossolos ou Argissolos frequentes na Amazônia. Estes solos são altamente lixiviados, pobres em nutrientes e com baixa capacidade de troca catiônica.

Tabela 1. Atributos físico-químicos dos solos na camada 0-10 cm, em Terra Preta do Índio (TPI), solos de transição (ST) e solos adjacentes (SA) da Amazônia central. Os valores são médias de cinco réplicas (n=5) com seus desvios-padrão

Tipo de solo	Local	N (g kg ⁻¹)	P disponível (mg kg ⁻¹)	K (cmolc kg ⁻¹)	C orgânico (%)	Densidade (g cm ³)	argila	areia (%)	silte
TPI	EA	0,19 ± 0,06	112 ± 4,7	0,08 ± 0,03	3,9 ± 0,5	1,1 ± 0,07	60,5 ± 3,0	23,6 ± 2,4	15,9 ± 3,1
	URU	0,14 ± 0,03	13,2 ± 4,1	0,03 ± 0,01	3,8 ± 0,7	1,2 ± 0,04	7,5 ± 0,5	85,9 ± 0,8	6,6 ± 0,3
	AUT	0,13 ± 0,2	10,9 ± 1,9	0,07 ± 0,01	3,0 ± 0,2	1,2 ± 0,05	19,3 ± 2,8	65,4 ± 2,2	15,2 ± 0,7
	RP	0,17 ± 0,04	4,7 ± 1,1	0,03 ± 0,01	2,6 ± 1,1	1,2 ± 0,04	15,5 ± 4,7	79,5 ± 3,2	5,0 ± 1,6
	LG	0,36 ± 0,03	901 ± 253	0,14 ± 0,09	5,1 ± 0,5	1,0 ± 0,14	42,0 ± 2,2	39,7 ± 2,5	18,3 ± 0,4
ST	EA	0,16 ± 0,03	26,0 ± 4,1	0,09 ± 0,06	2,2 ± 0,4	1,1 ± 0,04	19 ± 3,0	73,8 ± 3,6	7,1 ± 0,5
	URU	0,17 ± 0,05	6,0 ± 1,3	0,03 ± 0,01	3,2 ± 0,2	1,2 ± 0,05	25,8 ± 1,0	66,9 ± 4,0	7,3 ± 4,4
	AUT	0,13 ± 0,05	6,4 ± 1,3	0,05 ± 0,01	2,9 ± 0,2	1,2 ± 0,04	25,5 ± 4,0	60,6 ± 3,4	13,9 ± 0,6
	RP	0,09 ± 0,04	3,7 ± 2,2	0,04 ± 0,01	2,3 ± 1,1	1,2 ± 0,03	40,0 ± 4,5	51,4 ± 3,9	8,6 ± 1,8
	LG	0,18 ± 0,03	62,7 ± 19,1	0,03 ± 0,01	2,6 ± 0,6	1,0 ± 0,06	36 ± 26,0	55,6 ± 27	8,4 ± 2,1
SA	EA	0,19 ± 0,02	7,1 ± 2,2	0,06 ± 0,01	2,5 ± 0,3	1,1 ± 0,05	74,5 ± 4,3	14,0 ± 1,3	11,5 ± 3,0
	URU	0,18 ± 0,04	3,5 ± 1,0	0,05 ± 0,02	2,5 ± 0,3	1,2 ± 0,10	61,8 ± 2,8	27,2 ± 3,1	11,0 ± 5,5
	AUT	0,12 ± 0,03	3,1 ± 0,6	0,06 ± 0,02	1,4 ± 0,6	1,2 ± 0,07	78,5 ± 1,3	5,7 ± 0,6	15,8 ± 0,8
	RP	0,12 ± 0,03	2,3 ± 1,3	0,03 ± 0,01	1,6 ± 0,3	1,2 ± 0,07	30,8 ± 8,8	59,7 ± 10,3	9,5 ± 4,1
	LG	0,15 ± 0,01	1,8 ± 0,3	0,06 ± 0,04	2,0 ± 0,1	1,0 ± 0,0	28,5 ± 3,3	61,3 ± 3,2	10,2 ± 1,7

Nas áreas de estudo predominam florestas secundárias de aproximadamente 20-30 anos de idade, com abundância de palmeiras principalmente tucumã (*Astrocaryum aculeatum*), buriti (*Mauritia flexuosa*), limorana (*Chomelia anisomeris*), leguminosas como o Ingá (*Ingá sp.*), também espécies pioneiras como lacre (*Vismia sp.*) e embaúba (*Cecropia sp.*) entre outras.

O sitio EA, localizado nas coordenadas geográficas 3°06'53" S e 59°54'31" W, dentro do perímetro urbano de Manaus, foi uma área de pastagem abandonada há 25 anos atrás, onde cresceu uma floresta secundária.

O LG, localizado a 3°13'45" S e 60°15'56" W, no município de Iranduba, foi uma área de exploração madeireira, e depois sistemas de roças tradicionais, sendo abandonadas há aproximadamente 20 anos atrás. Nesta área, o local da TPI foi também um antigo sítio, com abundância de palmeiras e árvores frutíferas.

Na área do URU, localizado a 2°23'39" S e 59°34'29" W, no município de Rio Preto da Eva; na área do solo de transição foi realizada a extração de madeira na área, depois estabelecidas roças tradicionais, sendo abandonadas aproximadamente 20 anos atrás. A área da TPI foi menos explorada, e a floresta secundária é mais antiga do que a área do solo de transição. No solo adjacente foi realizada a exploração de madeira aproximadamente 30 anos atrás.

No sitio RP, localizado a 02°40'51" S e 59°43'15" W, no município de Rio Preto da Eva, no local da TPI foram estabelecidas roças tradicionais, depois pastagens e roças novamente, sendo abandonadas aproximadamente 20 anos atrás; no local do solo de transição e do solo adjacente, foi realizada exploração madeireira, sistema de roças, e depois estas áreas foram abandonadas.

Na área do AUT, localizado a 3°22'47" S e 59°41'49" W, no município de Careiro, a área do solo de transição é uma floresta secundária muito antiga com mais de 30 anos de idade, sendo desconhecido o seu histórico de manejo, antes de se tornar uma capoeira. A área da TPI foi cultivada de forma intensiva com roças tradicionais, pastagens e novamente roças, sendo abandonada aproximadamente 20 anos atrás. No solo adjacente, a área foi desmatada e utilizada durante pouco tempo no sistema de roças, sendo abandonada há mais de 20 anos atrás.

Utilizou-se o delineamento experimental blocos inteiramente ao acaso, com cinco repetições (locais) e três tratamentos: Terra Preta do Índio (TPI), solo de transição (ST) e solo adjacente (SA); cada parcela tem uma área de 1600 m²; no total foram 15 parcelas (pontos de amostragem). Estas áreas de floresta secundária foram escolhidas por terem aproximadamente a mesma idade de abandono (20 a 30 anos) e serem de acesso relativamente fácil. Os solos de TPI e ST foram identificados pelo horizonte antrópico de coloração escura, presença de restos de cerâmicas indígenas e análises químicas de fósforo e carbono orgânico do solo.

Amostragem do solo

Foram escavados três perfis de solo em cada parcela, totalizando quarenta e cinco perfis em todos os locais de estudo. Para realizar a amostragem de solo destinada à avaliação do teor de carbono orgânico, teor de C nas frações da matéria orgânica e a densidade aparente do solo. Na parcela de cada solo estudado foram coletadas três amostras de solo, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40, 40-70 e 70-100 cm, totalizando 225 amostras de solo nos cinco locais. Para a avaliação da densidade do solo, nas mesmas profundidades mencionadas anteriormente, foram retiradas quatro amostras indeformadas em cada profundidade, utilizando um anel volumétrico; as amostras de solo foram colocadas em estufa a 105 °C durante 24 horas e depois pesadas. A densidade aparente foi calculada pela fórmula:

Densidade aparente (g cm^3) = massa da amostra seca de solo (g) / volume do solo coletado (cm^3)

Os valores da densidade aparente foram utilizados para calcular os estoques de carbono do solo até 1 m de profundidade.

Análises físico-químicas do solo

Para as análises do carbono orgânico, nitrogênio e o C nas frações da matéria orgânica, as amostras de solo foram secas ao ar (Método Terra Fina Seca ao Ar - TSFA), destorroadas, passadas em peneira de malha de 2 mm, e guardadas em sacos plásticos. Uma porção aproximada de 50 g de cada amostra foi triturada e passada em peneira de malha de 0,210 mm, para a análise de C orgânico e nitrogênio. A porção restante das amostras até os 40 cm de profundidade, foi reservada para o fracionamento da matéria orgânica do solo.

O carbono orgânico e o nitrogênio do solo foram determinados no aparelho Auto-Analisador de C de fase gasosa da marca Fisons, modelo NA 1500. Os estoques de carbono em cada profundidade foram calculados através da seguinte fórmula:

Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) = teor de carbono orgânico do solo (%) * densidade solo (g cm^{-3}) * espessura da camada do solo (cm).

Para efetuar o fracionamento físico da matéria orgânica foi seguida a metodologia adaptada de Sohi et al. (2001) adaptada por Machado (2002). O método separa o C nas frações leve (fração leve livre e fração leve intra-agregada) através do fracionamento densimétrico, e a fração pesada (C das frações areia, silte e argila) através do fracionamento granulométrico. A fração leve (FL) foi isolada por flotação em solução de iodeto de Na, densidade de $1,8 \text{ g cm}^3$; o material presente na superfície da solução foi aspirado e filtrado utilizando filtro de fibra de vidro Whatman tipo GF/A de $1,6 \mu\text{m}$ de porosidade, em um sistema com vácuo (Sistema Asséptico Sterifil, 47 mm – Millipore). O material obtido foi seco em estufa à temperatura de $65 \text{ }^\circ\text{C}$ por 72 h. O C da fração leve intra-agregada (FLI), foi obtido após aplicação de ultra-som durante 3 minutos, equivalente a uma intensidade de 400 J mL^{-1} com o objetivo de desagregar e dispersar o solo. Posteriormente foi realizada a centrifugação, filtragem e lavagem, repetindo o procedimento anterior para a coleta da fração leve livre. O C das frações FLL e FLI foi quantificado por combustão via seca em analisador elementar automático CHNS.

A fração pesada (carbono associado às frações areia, silte e argila do solo), foi obtida com o material restante da amostra, utilizando a metodologia proposta por Gavinelli et al. (1995). Adicionou-se 0,5 g de hexametáfosfato de sódio (HMP) à amostra residual e agitou-se durante 14 horas, visando à dispersão total da amostra do solo. O carbono da fração associada à areia ($> 53 \mu\text{m}$) foi obtido por peneiramento úmido. O carbono associado às frações silte (2-53 μm) e argila (0-2 μm), foi obtido por sedimentação. Após coletadas, as frações foram secas em estufa a 65 °C, pesadas, maceradas e realizada a determinação em auto-analizador CHNS. O teor de carbono na fração silte foi obtido indiretamente, pela diferença entre as frações argila+silte e argila.

Análises estatísticas

Análises de variância (ANOVA) foram realizadas para verificar a existência de diferenças significativas entre os diferentes tratamentos (Terra Preta, solo de transição e solo adjacente), nas variáveis estoque de carbono e carbono nas diferentes frações da MOS; e as diferenças entre os tratamentos e as diferentes profundidades (0-10, 10-20, 20-40, 40-70 e 70-100 cm). Para os dados que apresentaram diferenças significativas, foi aplicado o teste de Tukey a nível de 5 % de significância.

RESULTADOS

Estoques de carbono orgânico no solo

Os teores de carbono orgânico do solo foram maiores nas TPI e menores nos SA (ANOVA; $F= 13,3$; $P<0,001$), decrescendo com a profundidade em todos os tipos de solo (Tabela 2). A relação CN do solo foi significativamente maior nas TPI e ST do que nos SA (ANOVA; $F= 9,9$, $p< 0,001$).

Aproximadamente 32% do total de carbono orgânico do solo está estocado nos primeiros 20 cm de profundidade em todos os tipos de solo (Tabela 2). Quantificando os estoques totais de carbono no solo até 1 m de profundidade, estes foram 45 % e 19 % maiores nas TPI e ST, comparadas com os SA (ANOVA; $F= 6,15$, $p< 0,01$). Mesmo nas camadas até 70 cm, os estoques de C nas TPI continuaram sendo maiores do que nos SA. As proporções de C foram distribuídas de maneira similar em todos os tipos de solos estudados, sendo maiores proporções nas camadas superficiais até os 20 cm de profundidade, e menores proporções nas camadas mais profundas.

Tabela 2. Estoques de carbono orgânico nas diferentes camadas do perfil do solo até 1 m de profundidade, em Terra Preta do Índio (TPI), solos de transição (ST) e solos adjacentes (SA) da Amazônia central. Os valores são médias de cinco réplicas (n=5) com seus desvios-padrão

Tipos solo	Profundidade (cm)	C orgânico (%)	C:N	Estoque de C (Mg C ha ⁻¹)	Proporção C %	Estoque Total (Mg C ha ⁻¹)
Terra Preta	0-10	3,7± 1,2	20± 4,6	40,6± 7,2	17,5	232± 59
	10-20	2,8± 1,5	16± 1,7	33,6± 12,2	14,5	
	20-40	2,4± 0,5	18± 3,5	61,3± 13,3	26,5	
	40-70	1,6± 0,7	20± 8,8	63,0± 27,6	27,2	
	70-100	0,8± 0,4	14± 1,8	33,2± 9,4	14,3	
S. Transição	0-10	2,7± 0,6	19± 7,1	32,5± 5,5	20,5	159± 53
	10-20	2,0± 1,4	14± 4,3	26,3± 14,8	16,5	
	20-40	1,5± 0,4	13± 3,6	40,8± 15,7	25,7	
	40-70	0,6± 0,3	15± 5,4	37,2± 16,5	23,4	
	70-100	0,5± 0,2	11± 1,1	21,9± 6,8	13,8	
S. Adjacente	0-10	2,0± 0,5	13± 1,0	20,5± 5,2	16,0	128± 23
	10-20	2,0± 0,5	14± 1,6	21,7± 3,7	16,9	
	20-40	1,4± 0,6	14± 3,8	33,0± 6,2	25,8	
	40-70	0,8± 0,3	11± 1,9	30,7± 9,0	24,0	
	70-100	0,6± 0,2	10± 1,3	22,2± 6,2	17,3	

Carbono nas frações da MOS

Os maiores teores de C foram encontrados na fração silte+argila, representando 73 % do C total extraído nas TPI, 71 % nos ST, e 75 % nos SA. O C na fração silte+argila diminuiu com a profundidade, sendo maior nas camadas superficiais, e menor nas camadas mais profundas, em todos os tipos de solo (Tabela 3). O segundo maior teor de C foi encontrado na fração leve livre, sendo menor nas TPI e ST, e maior nos SA. Os teores de carbono nesta fração diminuíram com a profundidade em todos os tipos de solo. Os teores de carbono na fração areia foram maiores nas TPI comparada com os ST e SA (ANOVA, F= 6,2; p<0,005) diminuindo com a profundidade. O menor teor de C foi encontrado na fração intra-agregada, sendo similar entre os tipos de solo estudados; também diminuiu com a profundidade.

A porcentagem média de recuperação do carbono, do total de carbono extraído através do método de fracionamento da MOS utilizado, foi em média, de 60 % nas TPI, 69 % nos ST, e de 105 % nos solos adjacentes.

Tabela 3. Teores de carbono (g kg^{-1}) nas frações da matéria orgânica do solo, até 40 cm de profundidade, nos diferentes solos estudados: TPI, ST e SA, seguido do desvio-padrão. A letra maiúscula indica a diferença entre tratamentos, e a minúscula, diferenças entre as profundidades em cada tratamento

Tipos solo	Profundidade (cm)	Leve livre Intra-agregada Areia Argila+silte				Recuperação de C %
		(g kg^{-1})				
Terra Preta	0-10	3,5± 1,0 Aa	0,6± 0,3 Aa	2,4± 1,2 Aa	15,1± 10 Aa	57± 19
	10.20	1,9± 0,9 Aa	0,3± 0,2 Aa	1,3± 0,6 Aa	13,8± 7,9 Aa	63± 24
	20-40	2,1± 0,4 Ab	0,2± 0,2 Ab	0,9± 0,2 Ab	11,2± 4,8 Aa	61± 18
Solo transição	0-10	3,8± 2,5 Aa	0,4± 0,2 Aa	1,3± 0,6 Ba	10,5± 2,3 Aa	62± 19
	10.20	2,3± 0,8 Aa	0,2± 0,1 Aa	0,9± 0,5 Bb	10,2± 2,8 Aa	78± 29
	20-40	2,1± 1,2 Ab	0,1± 0,1 Ab	0,7± 0,4 Bb	7,4± 3,4 Aa	67± 26
Solo adjacente	0-10	6,8± 4,5 Ba	0,6± 0,6 Aa	1,0± 0,5 Ba	16,6± 7,1 Aa	110± 41
	10.20	4,9± 2,8 Ba	0,5± 0,3 Aa	0,8± 0,3 Bb	14,5± 5,8 Aa	101± 24
	20-40	3,3± 2,4 Bb	0,2± 0,2 Ab	0,4± 0,2 Bb	12,3± 5,6 Aa	105± 28

Do total de C extraído, as maiores proporções de C foram encontradas na fração argila+silte, seguida da fração leve livre em todos os tipos de solo (Figura 2), e as menores proporções foram encontradas na fração intra-agregada. Em profundidade, a proporção de C na fração argila+silte aumentou com a profundidade, de 66 % para 77 % nas TPI, de 66 % para 73 % nos ST, e de 71 % para 80 % nos SA. A proporção de C na fração FLL em todos os tipos de solo diminuiu com a profundidade: nas TPI de 18 % para 15 %, nos ST diminuiu de 23 % para 20 % e nos SA de 23 % para 15 %. As menores proporções de C foram encontradas na fração intra-agregada em todos os tipos de solo, diminuindo com a profundidade do solo, exceto na camada 0-10 dos solos adjacentes, que apresentaram proporções de C similares em todas as profundidades estudadas.

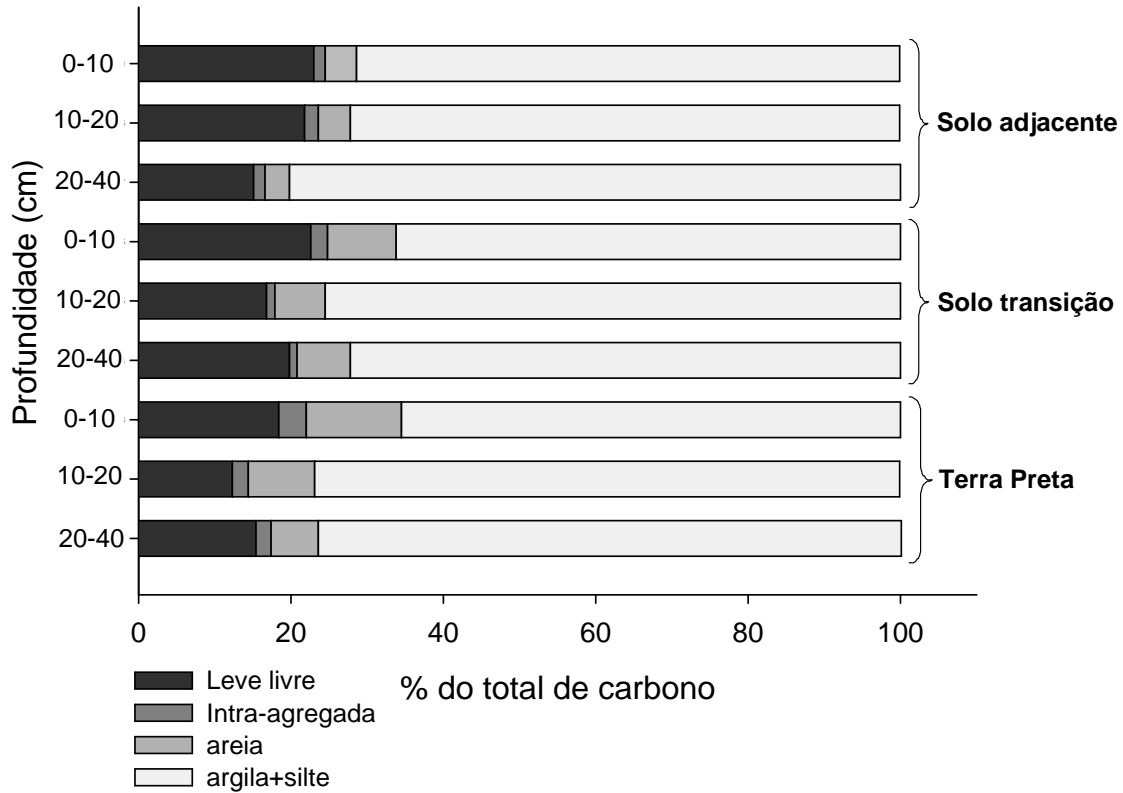


Figura 2. Distribuição percentual das frações da matéria orgânica do solo (%), até 40 cm de profundidade, nos solos de Terra Preta, solo de transição e solo adjacentes da Amazônia central

DISCUSSÃO

Estoque de carbono no solo

Maiores estoques de carbono orgânico até 1 m de profundidade nas TPI, comparados com os SA, foram relatados por Glaser, et al. (2003), com estoques de 147 – 506 Mg C ha⁻¹ nas Terra Pretas e 72 – 149 Mg C ha⁻¹ nos solos adjacentes, concordando com os resultados encontrados neste estudo (165 – 313 Mg C ha⁻¹ nas TPI, e 86 – 150 Mg C ha⁻¹ nos SA). Em solos predominantes da floresta amazônica, Moraes et al. (1995) encontraram 80 - 130 Mg C ha⁻¹; Batjes and Dijkshoorn (1999), encontraram 98 Mg C ha⁻¹. A recalcitrância química do C pirogênico ou carvão, encontrado abundantemente nas TPI, evidenciam que é o fator responsável pela alta estabilidade do C nestes solos (Glaser, 1999, 2000, Solomon, 2007; Liang, 2008). Desta forma, a proteção química é um importante mecanismo de estabilização do C, dificultando a sua degradação microbiana. A proteção física dos compostos orgânicos pode ser um mecanismo importante, formando complexos organo-minerais (Glaser, 2000;

Sombroek, 2003; Liang, 2008), associados especialmente à argila e ao silte, como foi observado também no presente estudo.

Os estoques de C no solo diminuem com a profundidade, o que é explicado pelo contínuo aporte de liteira sobre a superfície do solo em sistemas florestais, aumentando desta forma o estoque nas camadas superficiais.

As Terras Pretas do Índio apresentaram maior estoque de carbono comparadas com os solos adjacentes; porém, não foram encontradas evidências de um maior acúmulo de carbono recente proveniente da liteira fina nas TPI. Para conhecer o potencial de acúmulo do carbono proveniente da matéria orgânica nova nos diferentes tipos de solo estudados, serão necessários estudos específicos sobre os processos de humificação do carbono lábil. No entanto, estudos com solos da Amazônia, mostram que os solos de Terra Preta de Índio são mais eficientes em estocar carbono do que os solos adjacentes (Soares, 2007).

Carbono nas frações da MOS

A maior parte do carbono orgânico em todos os solos estudados, foi associada às frações mais finas, associada a silte e argila, contribuindo em uma média de 73 % nas TPI, 71 % nos ST e 75 % nos SA, do total do C estocado no solo. Este resultado sugere que a proteção física também é um importante mecanismo de estabilização do C nos solos estudados, impedindo a decomposição do material orgânico. Liang et al. (2008) encontraram baixa proporção de carbono na fração solúvel e leve, e altas proporções de C na fração organo-mineral nas TPI (72 – 90 %) comparado com os SA (2 – 70 %), e concluíram que a recalcitrância e a proteção física contribuem para a estabilidade do C nas TPI. Glaser et al. (2000) mostram que a recalcitrância química é o principal fator responsável pela alta estabilidade do C nas TPI; embora a proteção física também tenha contribuído em menor proporção para a estabilização do C.

O carvão abundante em anéis aromáticos policíclicos na sua composição, contém uma grande quantidade de pequenos poros, que se tornam inacessíveis para os microrganismos, dificultando o ataque microbiano a compostos orgânicos (Smith and Noack, 2000), tornando-se resistente à degradação bacteriana. Freixo (2002) encontrou alta proporção de carbono na fração pesada em todas as profundidades, especialmente nas frações silte e argila. Geralmente o teor de C aumenta com a diminuição do tamanho das partículas (Glaser, 2001). Solomon (2002) encontrou que o C ligado à fração argila é mais estável do que o carbono ligado às frações areia e o silte. Neves et al., (2005), concluíram que o C associado às frações mais finas encontram-se em estágio de decomposição mais avançado do que a matéria orgânica

associada às frações maiores. Marschener (2008) encontrou que a matéria orgânica humificada foi associada com os minerais do solo. Grandy e Robertson (2007) concluíram que o C associado à fração pesada tem um alto potencial de acúmulo do C, sendo a proteção físico-química um importante mecanismo para o seqüestro do C nos solos (Jastrow, 2007). Existe uma relação entre a matéria orgânica e a fração mineral do solo, formando complexos organo-minerais (Schnitzer, 1986), principalmente em Latossolos, devido à proteção física proporcionada pela argila contra a ação dos microrganismos (Feller, 1997).

A menor proporção de carbono na fração leve e intra-agregada (Tabela 3) indicam possivelmente uma alta ciclagem do C desta fração, possivelmente pela rápida decomposição microbiana do carbono lábil fornecido pela liteira das plantas (Christensen, 2000), favorecida pelas temperaturas elevadas e alta precipitação (Paul, 2008). A fração leve é mais disponível para a microbiota do que a fração pesada, diminuindo, desta forma, os estoques de C nesta fração.

As baixas taxas de recuperação do C do solo nas TPI e ST (60 e 69 %) comparadas com os SA (105 %), podem ser em parte, devidas à maior quantidade de C microbiano nas TPI do que nos SA, e que não estão acrescentadas nestes cálculos da porcentagem de recuperação. Liang et al. (2009) encontraram altas quantidades de C na biomassa microbiana em TPI comparada com os SA. No capítulo II deste trabalho, se mostram resultados similares, encontrando alto C da biomassa microbiana nas TPI.

Os resultados indicam que a proteção física é um importante mecanismo de estabilização do C tanto nas TPI como nos solos adjacentes, podendo aumentar o tempo de residência do C e estocando-o por longo período. Não foi medido o quanto este mecanismo contribui para a estabilização do C no solo, pelo que serão necessários estudos direcionados para esta finalidade.

CONCLUSÕES

O estoque total de carbono orgânico, até 1 m de profundidade, é maior nos solos que apresentam horizontes antrópicos (Terras Pretas do Índio e solos de transição) comparada com os estoques nos solos não-antrópicos (solos adjacentes), estando a maior proporção de carbono orgânico associado às frações mais finas da matéria orgânica, silte e à argila, evidenciando a importância da proteção física do material orgânico para a estabilização do C em solos antrópicos e solos não-antrópicos, estocando-o por longo tempo. Sendo a proteção física um importante mecanismo de estabilização do C tanto nas TPI como nos solos

adjacentes, é necessário conhecer o quanto este mecanismo contribui para a estabilização do C.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Accardi-Dey, A., 2003. Black carbon in marine sediments: quantification and implications for the sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons. Thesis, MIT-WHOI.
- Anderson, J.M. and Ingram, J.S.I. 1993. Tropical Soil Biology and Fertility: a Handbook of Methods. CAB International, Wallingford, 221 p.
- Batjes, N. H., Dijkshoorn, J.A. 1999. Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. *Geoderma* 89:273–286.
- Bernoux, M., Arrouays, M., Cerri, C.C., Volkoff, G.A. and Trieck, J. 1998. Estimation des stocks de carbone des sols du Rondonia (Amazonie brésilienne). *Études et gestion des sols* 5:31–42.
- Braida, W.J., Pignatello, Y.F., Lu, P.I., Ravikovitch, P.I., Neimark, A.V. and Xing, B.S. 2003. Sorption hysteresis of benzene in charcoal particles. *Environ. Sci. Technol.* 37: 409-417.
- Christensen, B.T. 2000. Organic matter in soil – structure, function and turnover. In: *Plant Production*, Tjele, 95 p.
- Denevan, W.M. 1996. A bluff bodel of riverine settlement in prehistoric Amazonia. *Annals of the Association of American Geographers* 86:654-681.
- Feller, C., Beare, M.H. 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79:69-116.
- Fearnside, P.M. 1985. Brazil's Amazon forest and the global carbon problem. *Interciência* 10:179-186.
- Fearnside, P.M. 2000. Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Climatic Change* 46:115–158
- Glaser, B. 1999. Eigenschaften und Stabilität des Humuskörpers der “Indianerschwarzerden” Amazoniens. *Bayreuther Bodenkundliche Berichte* 68, University of Bayreuth, Germany, 196 p.
- Glaser, B., Balashov E., Haumaier, L., Guggenberger, G., Zech, W. 2000. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Organic Geochemistry* 31:669-678.
- Glaser B., Haumaier L., Guggenberger G., Zech W. 2001. The Terra Preta phenomenon - a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* 88:37–41.

- Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in tropics with charcoal – a review. 2002. *Biology and fertility Soils* 35:219–230.
- Glaser B., Guggenberger, G., Zech, W., Ruivo, M. L. 2003. Soil organic matter stability in Amazonian dark earths. In: Lehmann, J., Kern, D.C., Glaser, B. and Woods, W.I. (eds.) *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 141-158 p.
- Golchin, A., Clarke, P., Baldock, J.A., Hogashi, T., Skejmetad, J.O., Oades, J.M. 1997. The effects of vegetation and burning on the chemical composition of soil organic matter in a volcanic ash soil as shown by ¹³C NMR spectroscopy: I whole soil and humic acid fraction. *Geoderma* 76:155-174.
- Grandy, A.S. and Robertson, G.P. 2007. Land-use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms. *Ecosystems* 10:58-73.
- Gustafsson, O., Haghseta, F., Chan, C., MacFarlane, J., Gschwend, P.M., 1997. Quantification of the dilute sedimentary soot phase: implications for PAH speciation and bioavailability. *Environmental Science and Technology* 31(1):203–209.
- Heckenberger, M.J., Petersen, J.B. and Neves, E.G. 1999. Village size and permanence in Amazonia: Two archaeological examples from Brazil. *Latin American Antiquity* 10:353-376.
- Jastrow, D.J., Amonette, J.E. and Bailey, V.L. 2007. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change* 80:5-23.
- Juma, R.A. and McGill, W.B. 1986. Community-level interactions control proliferation of *Azospirillum Brasilense* Cd in microcosms. *Soil Biology & Biochemistry* 27:189-196.
- Kämpf, N. and Kern, D.C. 2003. Classification of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: Lehmann, J.; Kern, D.C.; Glaser, B.; Woods, W.I. (Eds), *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management* The Netherlands: Kluwer Academic Publisher, pp. 77-102.
- Krull, E., Baldock, J., Skjemstad, J. 2001. Soil texture effects on decomposition and soil carbon storage In: Kirschbaum, M., Mueller, R. (eds) pp. 103-110. *Net Ecosystem Exchange*, Canberra: Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting.
- Lal, R., Kimble, J., Follet, R. F. 1997. Pedospheric processes and the carbon cycle. In: Lal, R., Blum, W.H., Valentine, C., Stewart, B.A. (Eds) *Methods for assessment of soil degradation*. Boca Raton: CRC Press, 1-8.

- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J. O., Thies, J., Luizão, F.J., Petersen, J. and Neves, E.G. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1719-1730.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Sohi, S., Thies, J. E., Skjemstad, J.O., Luizão, F.J., Engelhard, M. H., Neves, E., Wirick, S. 2008. Stability of biomass-derived black carbon in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72:6069–6078.
- Liang, B., Lehmann, J., Sohi, S.P., Thies, J.E., O'Neill, B., Trujillo, L., Gaunt, J., Solomon, D., Grossman, J., Neves, E.G., Luizão, F.J. Black carbon affects the cycling of non-black carbon without priming of aged black carbon in soil. *Organic Geochemistry* (no prelo).
- Lehmann J., Kern D.C., Glaser B. and Woods W. I. 2003. *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. 505 p.
- Lehmann, J.; Gaunt, J. Rondon, M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11:403–427.
- Lugo, A.E. and Brown, S. 1993. Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. *Plant and Soil* 149:27–41.
- Machado, P.L.O.A. 2002. Fracionamento físico por densidade e granulometria para quantificação de compartimentos da matéria orgânica do solo – um procedimento para a estimativa pormenorizada do seqüestro de carbono pelo solo. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, (comunicado técnico, 9), 6 p.
- Madari, B.E., Sombroek, W.G., Woods, W.I. 2004. Research on the anthropogenic dark earth soils of Amazonia (Terra Preta e Terra Mulata). Could it be a solution for sustainable agricultural development in the Amazon? In: Glaser, B., Woods, W.I. (Org). *Explorations in Amazonian Dark Earths*, 1 ed. Heidelberg. Springer-Verlag pp. 169-200.
- Marschener, B., Brodowski, S., Dreves, A., Gleixner, G., Gude, A., Grootes, P.M., Hamer, U., Heim, A., Rong, J., Kaiser, K., Kalbitz, K., Kramer, C., Leinweber, P., Rethemeyer, J., Schäffer, A., Schmidt, M.W. Schwark, L., Wiesenberg, G.L. 2008. How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 171: 91–110.
- Mitra, S. 2002. Sources of terrestrially-derived organic carbon in Lower Mississippi River sediments: implications for differential sedimentation and transport at the coastal margin. *Marine Chemistry* 77:211 –223.
- Moraes, J.L., Cerri, C.C., Melillo, J.M., Kicklighter, D., Neill, C., Skole, D.L. and Steudler, P. 1995. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon basin. *Soil Science Society of America* 59 (1):244–247.

- Moreira, A. Fertilidade, material orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia ocidental. *Bragantia*, Campinas 66(2):307-315.
- Neves, C.S.V., Feller, C., Larré-Larrouy, M. 2005. Matéria orgânica nas frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Distroférico sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista de Ciências Agrárias*, Londrina 26(1):17-26.
- Pabst, E. 1991. Critérios de distinção entre Terra Preta e Latossolo na região de Belterra e os seus significados para a discussão pedogenética. *Boletim do Museu Paranaense Emilio Goeldi, Série Antropologia* 7(1):5-19.
- Paul, E.A. 1984. Dynamics of organic matter in soils. *Plant and Soil* 76:275-285.
- Paul, S., Flessa, H., Veldkamp, E., López-Ulloa, M. 2008. Stabilization of recent soil carbon in the humid tropics following land use changes: evidence from aggregate fractionation and stable isotope analyses. *Biogeochemistry* 87:247-263.
- Sanford R.L., Saldarriaga, J., Clark, K.E., Herrera, R. 1985. Amazon rain-forest fires. *Science* 227:53-55.
- Schmidt, M. and Noack, A. 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles* 14 (3):777-793.
- Schlesinger, W.H. 1999. Carbon sequestration in soils. *Science* 284:2095.
- Schnitzer M. and Preston C.M. 1986. Analysis of humic acids by solution and solid-state carbon-13 nuclear magnetic resonance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:326-331.
- Seiler W. and Crutzen P.J. 1980. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climate Change* 2:207-247.
- Skjemstad, J.O., Clarke, P., Taylor, J.A., Oades, J.M. and McClure, S.G. 1996. The chemistry and nature of protected carbon in soil. *Australian Journal Soil Research* 34: 251-271.
- Silveira MI, KERN DC, OLIVEIRA ER, FRAZÃO, FJL (2007) Seriam as Terras Pretas Arqueológicas grandes áreas contínuas? O caso dos sítios Bitoca 1 e Bitoca 2 na região de Carajás-PA In: Anais do XI Congresso da Sociedade Brasileira de Estudos do Quaternário-ABEQUA. Museu Goeldi, Belém, PA, Brasil
- Six, J., Callenwaert, S., Lenders, S., Gryze, S., Morris, S.J., Gregorich, E.G., Paul, E.A. and Paustian, K. 2002. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Sci. Am. J.* 66:1981-1987.
- Six, J., Elliot, E.T, Paustian, K., Doram, J.W. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 62:1367-1377.

- Soares, R. 2007. Agregação e distribuição da matéria orgânica em solos de Terra Preta do Índio da Amazônia central. Dissertação de mestrado. Niterói UFF. 107 p.
- Sohi, S.P., Mahieu N., Arah J.R. M., Powlson D.S., Madari B., and Gaunt J.L. 2001. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1121-1128.
- Solomon, D., Lehmann, J., Thies, J., Schäfer, T., Liang, B., Inyangi, J.K., Neves, E., Petersen, J., Luizão, F., Skjemstad, J. 2007. Molecular signature and sources of biochemical recalcitrance of organic C in Amazonian Dark Earths. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71:2285–2298.
- Sombroek W. 1966. Amazon Soils – a reconnaissance of soils of the Brazilian Amazon region. Centre for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen, Netherlands, 292 p.
- Sombroek, W.G., Nachtergaele, F.O. and Hebel A. 1993. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio* 22:417-426.
- Sombroek, W.G., Ruivo, M.D.L., Fearnside, P.M., Glaser, B., Lehmann, J. 2003. Amazonian Dark Earths as carbon stores and sinks. In: Lehmann, J., Kern, D.C., Glaser, B., Woods, W. Amazonian Dark Earths – Origin, Properties, and Management. Dordrecht, Kluwer Academic Publisher, pp. 125-139.
- Teixeira, L.B. and Bastos, J.B. 1989. Matéria orgânica nos ecossistemas de floresta primária e pastagens na Amazônia Central. *Boletim de Pesquisa* 99. EMBRAPA/ CPATU, Belém, 26 p.
- Tiessen, H., Cuevas, E., Chacon, P. 1994. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* 371:783–785.
- Van Breemen, N. and Feijtel, T.C.J. 1990. Soil processes and properties involved in the production of greenhouse gases, with special relevance to soil taxonomic systems In: Bouwman, A.F. (ed). *Soils and the greenhouse effect*. John Wiley & Sons, Chichester, UK. pp.195-220.
- Whitman, W.B., Coleman, D.C. and Wiebe, W.J. 1998. Prokaryotes: The unseen majority. *Proceeding of the National Academy of Science USA* 95:6578-6583.
- Woods, W.I. and McCannm J.M. 1999. Antropogenic origin and persistence of Amazonian dark earths. *Yearbook of the Conference of Latin Americanist Geographers* 25:7–14.
- Zech, W., Guggenberger, G., Zalba, P. Peinemann, N. 1997. Soil organic matter transformation in Argentinian Hapludolls, *Z. Pflanzenernaehr Bodenkd* 160:563–571.

CAPITULO 2

A DINÂMICA ATUAL DO CARBONO EM SOLOS ANTRÓPICOS E NÃO-ANTRÓPICOS (ADJACENTES) EM FLORESTA SECUNDÁRIA DA AMAZÔNIA CENTRAL

(Preparado de acordo com as normas da revista "Biogeochemistry")

Resumo

Os solos de Terra Preta do Índio contêm altas quantidades de matéria orgânica estável, estocada no solo por centenas ou milhares de anos, mesmo em condições edafoclimáticas tropicais. O entendimento da dinâmica da matéria orgânica e os mecanismos de estabilização de carbono (C) nesses solos é essencial para o estabelecimento de práticas de manejo que visem a fixação do carbono no solo, diminuindo as perdas na forma de CO₂ para a atmosfera. O objetivo foi estudar a dinâmica da matéria orgânica em solos antrópicos (Terras Pretas do Índio) e não-antrópicos (solos adjacentes), e identificar os fatores que controlam a dinâmica do C. O estudo foi realizado em cinco locais diferentes que apresentam solos de Terra Preta do Índio sob florestas secundárias antigas, localizadas na Amazônia central. O delineamento experimental foi de blocos inteiramente ao acaso, localizados em cinco áreas distintas; cada bloco constituído por três tratamentos: Terra Preta do Índio (TPI), solo de transição entre TPI-solo adjacente (ST) e solo adjacente não-antrópico (SA). Cada tratamento foi estabelecido em parcelas de 1600 m², totalizando 15 parcelas (pontos de amostragem). Foram avaliados o teor de carbono orgânico do solo, os fluxos de CO₂, a biomassa microbiana, a porcentagem de umidade do solo, a temperatura do solo e do ar, a textura do solo, as entradas de C através da liteira e a qualidade da liteira. Os resultados mostraram que a dinâmica da matéria orgânica apresentou influência sazonal, sendo foi similar entre os tipos de solos estudados, exceto a biomassa microbiana e o carbono orgânico, que foram maiores nas TPI. Os principais fatores que influenciam a dinâmica da matéria orgânica nos três tipos de solos foram: a sazonalidade, a temperatura do ar e a textura do solo; sendo este efeito maior sobre os ST do que na TPI e SA. A decomposição do carbono lábil das plantas (liteira) em solos de Terra Preta do Índio e solos adjacentes foi similar, liberando a mesma quantidade de CO₂ do solo para a atmosfera em ambiente natural. Porém, em ambiente controlado, as TPI emitiram menos CO₂ para a atmosfera. Não houve evidências de que o carbono lábil estimule as perdas do carbono estável que está estocado no solo por milhares de anos. O carbono estocado no solo das TPI pode estar beneficiando o crescimento da população microbiana, sendo os mecanismos ainda desconhecidos. O alto

potencial de retenção do carbono encontrado nos solos de TPI, onde são menores as perdas de CO₂ para a atmosfera por unidade de C do solo, apresentam importantes implicações na redução do efeito estufa e das mudanças climáticas.

Palavras-chave Terras Pretas do Índio, Fluxos de CO₂ do solo, floresta secundária, Amazônia central.

Introdução

O incremento excessivo do CO₂ na atmosfera e o seu potencial para alterar o clima do planeta, por ser um dos principais gases causadores do efeito estufa, tem despertado interesse em compreender melhor a dinâmica da matéria orgânica do solo e a capacidade que esta tem para seqüestrar carbono em diferentes ecossistemas terrestres (Schlesinger, 1999; Houghton, 2003; Paul, 2008). A matéria orgânica do solo (MOS), é considerada o maior reservatório terrestre de carbono do planeta, estocando aproximadamente 1500 Pg de C orgânico nos primeiros 100 cm, o que correspondem 75% do estoque de C orgânico terrestre (Post et al., 1982). Dependendo do uso e manejo do solo, a MOS pode funcionar como sumidouro ou fonte do CO₂ atmosférico (Lugo & Brown, 1993).

Em ambientes tropicais, as mudanças no uso da terra são de grande importância, uma vez que ecossistemas tropicais contêm grandes estoques de C (Moraes et al., 1995; Bernoux, 1998; Cerri et al., 1999) e uma reciclagem de C mais rápida do que em sistemas temperados (Trumbore et al., 1995), acelerada pelas rápidas mudanças no uso da terra que estão acontecendo na região (Skole & Tucker, 1993, Neill et al., 1997). Os solos da Amazônia geralmente são ácidos, com baixa capacidade de troca catiônica e baixa quantidade de nutrientes (Moreira & Malavolta, 2002). Nesta região, a disponibilidade e a manutenção dos nutrientes em ecossistemas naturais, dependem em grande parte, da entrada de C e nutrientes depositados através da liteira, que são conseqüentemente disponibilizados pelos microorganismos para as plantas (Schubart et al., 1987). A velocidade de disponibilização de nutrientes depende da taxa de decomposição, que é controlada pela temperatura, umidade, textura e qualidade do material orgânico (Zech et al, 1997). Com a substituição das florestas naturais por agroecossistemas, o aporte de material orgânico ao solo é reduzido, e alteram-se drasticamente os processos biogeoquímicos, ocorrendo geralmente perdas de matéria orgânica e degradação destes solos em pouco tempo de cultivo (Fernandes et al., 1997; Shang & Tiessen 1997; Silva et al., 1999).

O aumento dos estoques de matéria orgânica em agroecossistemas tropicais por longo tempo, poderia diminuir a emissão de gases para a atmosfera e ajudar na mitigação do efeito estufa, e, simultaneamente, melhorar a produtividade vegetal (Nissen & Wonder, 2003). É necessário o desenvolvimento de práticas de manejo e sistemas de produção sustentáveis que sejam produtivos e que visem promover a manutenção do estoque de C e sirvam como sumidouros. Em contraste com a maioria dos solos da região, as Terras Pretas do Índio (TPI) da Amazônia são solos férteis, com alta capacidade de troca catiônica (Liang et al., 2006) e quantidades excepcionalmente altas de matéria orgânica estável (Kern & Kämp, 1989; Pabst, 1991; Costa & Glaser, 2001; Lima et al., 2002), estocada no solo por centenas de anos (Glaser et al., 2000, Madari et al., 2004), mesmo sob as condições edafoclimáticas da Amazônia. A ocorrência de carvão e de fragmentos de cerâmica indicam que a origem destes solos está ligada a processos antropogênicos (Denevan, 1996; Woods & McCann, 1999; Glaser et al., 2001); sendo as áreas de Terra Preta antigas aldeias indígenas (Silveira, 2007).

A razão provável da estabilidade do carbono orgânico das Terras Pretas do Índio é a abundância de carbono pirogênico derivado do carvão (Sombroek, 1966; Glaser, 2000; Cunha 2005, Lehmann et al., 2006), produto da combustão incompleta da biomassa vegetal (Smith, 1980; Glaser, et al., 2001), que, devido à sua composição química altamente recalcitrante, o carvão pirogênico é altamente resistente à degradação microbiana (Skjemstad et al., 1996; Golchin et al., 1997; Schmidt et al., 2002; Liang, 2008).

Vários estudos têm demonstrado que o BC pode influenciar as dinâmicas de C e nutrientes no solo (Glaser et al., 2001; Lehmann et al., 2003; Steiner, 2002, Liang et al., 2006; Major et al., 2008). A presença de BC pode ter um maior impacto sobre a composição e reciclagem da matéria orgânica, especialmente em solos de floresta tropical e áreas de savanas (Fearnside, 1985; Sanford et al., 1985). Existem poucos estudos e ainda não estão claros os processos de estocagem da matéria orgânica nas TPI, e os mecanismos que controlam a estabilização do C nestes solos.

As TPI poderiam funcionar como sumidouros de CO₂ atmosférico, importantes para a mitigação do efeito estufa e das mudanças climáticas globais (Schmidt & Noack, 2000; Marris, 2006). O entendimento da dinâmica da matéria orgânica, assim como os fatores que controlam os estoques de C nas TPI, são essenciais para o desenvolvimento de práticas de manejo e usos da terra que visem aumentar os estoques de carbono no solo, e melhorar a produtividade dos agroecossistemas tropicais. Os objetivos deste trabalho foram: 1) Estudar a dinâmica da matéria orgânica do solo em TPI e solos adjacentes (não-antrópicos) e, 2) Identificar os fatores que controlam a dinâmica do C nestes solos.

Material e métodos

Área de estudo e delineamento experimental

O estudo foi realizado em cinco áreas na Amazônia central: Encontro das Águas (3° 06' S 59° 54' W), Lago Grande (3° 13' S 60° 15' W), Rio Preto da Eva (02° 40' S 59° 43' W), Rio Urubu (2° 23' S, 59° 34' W) e Autaz Mirim (3° 3' S 59° 65' W), todas no estado do Amazonas, Brasil. O clima da região é tropical úmido e quente, com precipitação média anual de 2500 mm, temperatura média anual de 24 a 26 °C e umidade relativa do ar de 80 a 93 %. O solo predominante na região é classificado como Latossolo Amarelo distrófico álico (Oxisolo), com alto teor de argila (> 60%), baixos níveis de nutrientes, pH muito ácido (4,0–4,5) e baixos teores de carbono orgânico no solo (Teixeira & Bastos, 1989).

Os solos com horizontes antrópicos (Terras Pretas do Índio) são solos formados por populações pré-colombianas 500 a 2500 anos atrás (Heckenberger et al., 1999; Neves et al., 2003), apresentam coloração escura, com presença de cerâmicas e carvão, elevados estoques de matéria orgânica estável e nutrientes, especialmente o fósforo (Tabela 1), Ca, Mg, Zn e Mn, ocorrendo sobre Latossolos (oxissolos), Argissolos (Ultissolos), Cambissolos (Inceptissolos) ou Espodossolos (podzóis), formando um horizonte A antrópico (Smith, 1980, Andrade, 1986). Geralmente ocorrem em áreas com pequenas manchas até 90 ha (Smith, 1980; Donatti, 2003), e apresentam um horizonte A antrópico de 40 a 150 m de profundidade (Neves et al., 2003).

Os solos de transição, denominados por Sombroek, (1966) de “Terras Mulatas”, são solos de coloração marron, localizados em áreas próximas às Terras Pretas, com pouca ou nenhuma cerâmica, horizonte A antrópico menos profundo, menor quantidade de carvão e menor quantidade de C e nutrientes, quando comparadas com as Terras Pretas (Kämpf, et al., 2003). Acredita-se que estas áreas com solos de transição foram usadas para o estabelecimento de cultivos de longa permanência, próximas às aldeias indígenas, sendo mantidas pela adição de resíduos orgânicos (Sombroek, 1966; Denevan, 1996).

Os solos não-antrópicos (adjacentes), são áreas próximas aos solos de transição, onde o solo é o original, sem manipulação antrópica ou acumulação de matéria orgânica estável nos horizontes superficiais. Geralmente, os solos adjacentes utilizados neste estudo foram da classe dos Latossolos, Espodossolos ou Argissolos frequentes na Amazônia. Estes solos são altamente lixiviados, pobres em nutrientes e com baixa capacidade de troca catiônica.

Tabela 1 Atributos físico-químicos dos solos na camada 0-10 cm, em Terra Preta do Índio (TPI), solos de transição (ST) e solos adjacentes (SA) da Amazônia central. Os valores são médias de cinco réplicas com seus respectivos desvios-padrão.

Tipo de solo	Local	N (g kg ⁻¹)	P disponível (mg kg ⁻¹)	K (cmolc kg ⁻¹)	C orgânico (%)	Densidade (g cm ³)	argila	areia (%)	silte
TPI	EA	0,19 ± 0,06	112 ± 4,7	0,08 ± 0,03	3,9 ± 0,5	1,1 ± 0,07	60,5 ± 3,0	23,6 ± 2,4	15,9 ± 3,1
	URU	0,14 ± 0,03	13,2 ± 4,1	0,03 ± 0,01	3,8 ± 0,7	1,2 ± 0,04	7,5 ± 0,5	85,9 ± 0,8	6,6 ± 0,3
	AUT	0,13 ± 0,2	10,9 ± 1,9	0,07 ± 0,01	3,0 ± 0,2	1,2 ± 0,05	19,3 ± 2,8	65,4 ± 2,2	15,2 ± 0,7
	RP	0,17 ± 0,04	4,7 ± 1,1	0,03 ± 0,01	2,6 ± 1,1	1,2 ± 0,04	15,5 ± 4,7	79,5 ± 3,2	5,0 ± 1,6
	LG	0,36 ± 0,03	901 ± 253	0,14 ± 0,09	5,1 ± 0,5	1,0 ± 0,14	42,0 ± 2,2	39,7 ± 2,5	18,3 ± 0,4
ST	EA	0,16 ± 0,03	26,0 ± 4,1	0,09 ± 0,06	2,2 ± 0,4	1,1 ± 0,04	19 ± 3,0	73,8 ± 3,6	7,1 ± 0,5
	URU	0,17 ± 0,05	6,0 ± 1,3	0,03 ± 0,01	3,2 ± 0,2	1,2 ± 0,05	25,8 ± 1,0	66,9 ± 4,0	7,3 ± 4,4
	AUT	0,13 ± 0,05	6,4 ± 1,3	0,05 ± 0,01	2,9 ± 0,2	1,2 ± 0,04	25,5 ± 4,0	60,6 ± 3,4	13,9 ± 0,6
	RP	0,09 ± 0,04	3,7 ± 2,2	0,04 ± 0,01	2,3 ± 1,1	1,2 ± 0,03	40,0 ± 4,5	51,4 ± 3,9	8,6 ± 1,8
	LG	0,18 ± 0,03	62,7 ± 19,1	0,03 ± 0,01	2,6 ± 0,6	1,0 ± 0,06	36 ± 26,0	55,6 ± 27	8,4 ± 2,1
SA	EA	0,19 ± 0,02	7,1 ± 2,2	0,06 ± 0,01	2,5 ± 0,3	1,1 ± 0,05	74,5 ± 4,3	14,0 ± 1,3	11,5 ± 3,0
	URU	0,18 ± 0,04	3,5 ± 1,0	0,05 ± 0,02	2,5 ± 0,3	1,2 ± 0,10	61,8 ± 2,8	27,2 ± 3,1	11,0 ± 5,5
	AUT	0,12 ± 0,03	3,1 ± 0,6	0,06 ± 0,02	1,4 ± 0,6	1,2 ± 0,07	78,5 ± 1,3	5,7 ± 0,6	15,8 ± 0,8
	RP	0,12 ± 0,03	2,3 ± 1,3	0,03 ± 0,01	1,6 ± 0,3	1,2 ± 0,07	30,8 ± 8,8	59,7 ± 10,3	9,5 ± 4,1
	LG	0,15 ± 0,01	1,8 ± 0,3	0,06 ± 0,04	2,0 ± 0,1	1,0 ± 0,0	28,5 ± 3,3	61,3 ± 3,2	10,2 ± 1,7

Nas áreas de estudo predominam florestas secundárias de aproximadamente 20-30 anos de idade, com abundância de palmeiras principalmente tucumã (*Astrocaryum aculeatum*), buriti (*Mauritia flexuosa*), limorana (*Chomelia anisomeris*), leguminosas como o Ingá (*Ingá sp.*), também espécies pioneiras como lacre (*Vismia sp.*) e embaúba (*Cecropia sp.*) entre outras.

O sitio EA, localizado nas coordenadas geográficas 3°06'53" S e 59°54'31" W, dentro do perímetro urbano de Manaus, foi uma área de pastagem abandonada há 25 anos atrás, onde cresceu uma floresta secundária.

O LG, localizado a 3°13'45" S e 60°15'56" W, no município de Iranduba, foi uma área de exploração madeireira, e depois sistemas de roças tradicionais, sendo abandonadas há aproximadamente 20 anos atrás. Nesta área, o local da TPI foi também um antigo sítio, com abundância de palmeiras e árvores frutíferas.

Na área do URU, localizado a 2°23'39" S e 59°34'29" W, no município de Rio Preto da Eva; na área do solo de transição foi realizada a extração de madeira na área, depois estabelecidas roças tradicionais, sendo abandonadas aproximadamente 20 anos atrás. A área da TPI foi menos explorada, e a floresta secundária é mais antiga do que a área do solo de transição. No solo adjacente foi realizada a exploração de madeira aproximadamente 30 anos atrás.

No sítio RP, localizado a 02°40'51" S e 59°43'15" W, no município de Rio Preto da Eva, no local da TPI foram estabelecidas roças tradicionais, depois pastagens e roças novamente, sendo abandonadas aproximadamente 20 anos atrás; no local do solo de transição e do solo adjacente, foi realizada exploração madeireira, sistema de roças, e depois estas áreas foram abandonadas.

Na área do AUT, localizado a 3°22'47" S e 59°41'49" W, no município de Careiro, a área do solo de transição é uma floresta secundária muito antiga com mais de 30 anos de idade, sendo desconhecido o seu histórico de manejo, antes de se tornar uma capoeira. A área da TPI foi cultivada de forma intensiva com roças tradicionais, pastagens e novamente roças, sendo abandonada aproximadamente 20 anos atrás. No solo adjacente, a área foi desmatada e utilizada durante pouco tempo no sistema de roças, sendo abandonada há mais de 20 anos atrás.

Utilizou-se o delineamento experimental blocos inteiramente ao acaso, com cinco repetições (locais) e três tratamentos: Terra Preta do Índio (TPI), solo de transição (ST) e solo adjacente (SA); cada parcela tem uma área de 1600 m²; no total foram 15 parcelas (pontos de amostragem). Estas áreas de floresta secundária foram escolhidas por terem aproximadamente a mesma idade de abandono (20 a 30 anos) e serem de acesso relativamente fácil. Os solos de TPI e ST foram identificados pelo horizonte antrópico de coloração escura, presença de restos de cerâmicas indígenas e análises químicas de fósforo e carbono orgânico do solo.

Amostragem de liteira e solo

As coletas para estimar a produção de liteira fina foram realizadas quinzenalmente, no período de janeiro de 2006 a janeiro de 2007. Foram instalados 12 coletores fixos de 50 x 50 cm, com armação de tubos PVC e malha de nylon de 1 mm, distribuídos de forma aleatória em cada parcela. As amostras coletadas foram secas ao ar e então, separadas nos seus principais componentes: folhas, material lenhoso com diâmetro <2 cm, material reprodutivo e fragmentos finos. As coletas da camada de liteira depositada na superfície do solo foram realizadas a cada 3 meses, iniciando em janeiro de 2006 e finalizando em outubro de 2006. Foi utilizado um quadro de madeira de 20 x 20 cm, coletando aleatoriamente quatro amostras, compostas com 5 sub-amostras de liteira. As amostras coletadas foram secas ao ar e depois separadas em folhas inteiras (L), folhas quebradas ou fermentadas (F) e material lenhoso. Ambas, as frações das amostras provenientes da camada da liteira e do coletor suspenso, foram secas em estufa a 65 °C por 72 horas e depois pesadas. Posteriormente foram

moídas utilizando um moinho tipo Wiley, passadas na peneira de 1 mm (20 mesh) e guardadas em frascos plásticos para posteriores análises químicas de C, N e lignina.

As coletas de solo foram realizadas em campanhas intensivas de 3 dias, em cada área de estudo, nas épocas seca, chuvosa e transição, sendo iniciadas em março de 2006 e finalizadas em novembro de 2006. Foram coletadas seis amostras compostas de solo na profundidade de 0-10 cm para a estimativa de biomassa microbiana-C e umidade do solo. Uma única coleta de solo foi realizada, para quantificar o estoque de carbono no solo até 1 m de profundidade, determinar a textura do solo e realizar o fracionamento da matéria orgânica nas diferentes profundidades; para isto foram abertos três perfis de 100 cm de profundidade em cada local, e foi coletada uma amostra de solo em cada perfil, nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-50 e 50-100 cm. Simultaneamente, foram coletadas quatro amostras de solo em cada perfil, nas diferentes profundidades até 1 m, usando anéis de aço (Kopecky) para avaliar a densidade aparente. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha de 2 mm. Dados de precipitação e temperatura para a área de estudo do Encontro das Águas, em Manaus, foram obtidos no Instituto de Meteorologia –INMET em Manaus; nas demais áreas de estudo foi medida diariamente a água das chuvas, usando-se um pluviômetro construído com funil metálico de 20 cm de diâmetro e um frasco plástico de 1 L.

Análises físicas

A textura do solo foi determinada pelo método da pipeta (Embrapa, 1997), usando o peróxido de hidrogênio a 30 % (H_2O_2) para digerir a matéria orgânica existente na amostra e um dispersante químico pirofosfato de sódio ($Na_4P_2O_7$) para fazer a separação da argila e o silte. Após a dispersão das partículas, foram pipetados 100 ml da suspensão, colocados em estufa a 105 °C durante 48 horas e depois pesados. As frações grosseiras (areia fina e grossa) foram separadas por tamisação, secas em estufa e pesadas. O silte corresponde ao complemento dos percentuais para 100 %.

Para estimar a densidade aparente do solo foi utilizado o método do anel volumétrico, que consiste na coleta de amostras indeformadas de solo com através de um anel de aço (Kopecky) com volume interno conhecido. As amostras dentro do anel foram colocadas na estufa a 105 °C durante 48 horas e pesadas. Os cálculos são:

$$\text{Densidade aparente (g cm}^3\text{)} = \text{peso da amostra seca} / \text{volume do anel}$$

A determinação da umidade do solo foi realizada com 10 g de amostra fresca colocada na estufa a 105 °C durante 48 horas. Os cálculos são:

$$\text{Umidade (\%)} = (\text{Peso amostra úmida} - \text{peso amostra seca} / \text{peso amostra seca}) \times 100.$$

Análises bioquímicas

As análises de carbono total do solo foram realizadas no aparelho Auto-Analisador CHN de fase gasosa da marca Fisons, modelo NA 1500. Para a quantificação do C nas diferentes frações da MOS, foi utilizada a metodologia de Sohi et al. (2001), para obter o C das frações leve (fração leve-livre e intra-agregada) e passiva (fração organo-mineral) da matéria orgânica. A fração leve foi separada por flotação em solução de iodeto de sódio, com densidade de 1,8 g cm³, e succionada no sobrenadante por filtração a vácuo (Millipore), com filtros de acetato de celulose (47 mm de diâmetro e 0,45 µm – Millipore) previamente pesados. Depois, a fração foi seca à temperatura de 65 °C por 72 h. A fração leve intra-agregada foi isolada após a aplicação de ultra-som por 3 minutos na solução de NaI, a uma intensidade de 400 Jml⁻¹; depois foi realizado o mesmo processo descrito para a fração leve-livre. A fração organo-mineral foi obtida a partir da amostra de solo residual, onde foi realizado o fracionamento granulométrico, e separadas as frações argila, silte e areia, seguindo a metodologia de Gavinelli et al. (1995). Os teores de carbono de todas as frações foi quantificado por combustão via seca em analisador CHN. Para a determinação do C e N no material vegetal, foi utilizado o aparelho Auto-Analisador de CHN de fase gasosa da marca Fisons, modelo NA 1500.

A estimativa do C da biomassa microbiana do solo foi feita pelo método da fumigação-extração (Brookes et al., 1985; Vance et al., 1987), modificado por Witt et al. (2000). Foram pipetados 60 ml de K₂SO₄ 0.5 M, e adicionados em frascos de vidro contendo 30 g de solo fresco. Nas amostras fumigadas foi adicionado 1 ml de clorofórmio livre de etanol. As amostras foram agitadas em agitador horizontal durante 4.5 h. O sobrenadante foi filtrado em papel de filtro de 2 µm de porosidade, livre de cinzas. O clorofórmio foi removido das amostras por evaporação através de burbulhamento com ar durante 15 minutos (modificado de Fierer & Schimel, 2003). A determinação da concentração de C foi realizada pelo método de Walkley-Black (Jackson, 1958) com aquecimento. A biomassa microbiana foi calculada pela relação:

$$\text{Biomassa-C (\mu g g solo)} = (\text{C fum} - \text{C não fum}) / 0,26 \text{ (K}_{\text{EC}} \text{ calculado por Feigl et al., 1995)}$$

Também foi utilizado um fator para corrigir a retenção da biomassa microbiana pelo carbono preto, que é variável em todos os solos, sendo maior nas Terras Pretas do Índio. Os fatores usados foram 0,43 para as TP e 0,64 para os solos adjacentes (Liang et al., 2009). Para os solos de transição foi utilizada a média entre o fator das TPI e SA, que foi de 0,53.

Análise química de liteira

Para a determinação da porcentagem de lignina na liteira foi utilizado o método TSBF (Anderson & Ingram, 1993), baseado no método ADF (Acid Detergent Fibre), de extração de fibras do material vegetal (Van Soest, 1963). O método consiste na destruição da celulose com uma solução de H₂SO₄ e cetiltrimetil brometo de amônio (CTAB). A celulose é destruída com ácido sulfúrico a 72 %, e a lignina é determinada pela diferença de peso (Anderson & Ingram, 1993).

O carbono e o nitrogênio da liteira foram determinados, utilizando o aparelho Auto-Analisador de CHN de fase gasosa da marca Fisons, modelo NA 1500.

Coefficiente de Decomposição (k_L)

O coeficiente de decomposição (k_L) da liteira foi calculado pela relação entre a produção anual de liteira (LF) e a média anual da camada de liteira acumulada na superfície do solo (CL), expressos em Mg ha⁻¹, a partir da equação proposta por Olson (1963):

$$k_L = LF / CL$$

Os valores de $K_L > 1$ indicam uma rápida decomposição da liteira, depositada sobre a superfície do solo.

Mineralização de carbono no solo

Para avaliar a mineralização de carbono foi utilizada a metodologia de Jenkinson & Powlson (1976), que mede o C-CO₂ liberado pelos microrganismos em um frasco hermético, em um determinado tempo de incubação, à temperatura de 25 °C. Foram pesados 50 g de solo (isento de raízes e carvão) provenientes dos primeiros 10 cm de profundidade de cada local de estudo, e colocados em frascos de vidro com volume de 500 ml. Junto com o solo foram colocados 10 ml de NaOH 1N em um frasco de plástico de 20 ml, e, em outro frasco, 10 ml de água destilada. Os frascos foram hermeticamente fechados e incubados durante 180 dias. Para conhecer a mineralização acumulativa, foram realizadas seis trocas de NaOH na mesma amostra de solo, aos 15, 30, 60, 120 e 180 dias. O CO₂ capturado em cada intervalo de tempo

pelo NaOH foi medido por titulometria potenciométrica com HCl 0,05 N. A mineralização do carbono pelos microrganismos foi calculada a partir da equação:

$$\mu\text{g de C-CO}_2/\text{g de solo} = (\text{HCl gasto amostra} - \text{branco} \times 0,6 \text{ mg} \times 1000 \mu\text{g})/\text{peso solo},$$

Onde, 1 ml de HCl 0,05 N equivale a 0,6 mg de C-CO₂.

Efluxos de CO₂ do solo

As medidas de CO₂ foram iniciadas em março de 2006 e finalizadas em novembro de 2006, nas diferentes áreas de estudo, em campanhas intensivas de 3 dias, simultaneamente com as coletas de solo para determinar a biomassa microbiana-C e umidade do solo. Para as medidas foi utilizado um analisador de gás por infravermelho portátil (EGM-3, PP Systems, U. K.), conectado a uma câmara de fluxo de CO₂ do solo (SCR-1, PP Systems, U. K.). Foram realizadas seis medidas aleatórias das emissões de CO₂ por tratamento, em cada medida foram realizadas três sub-medidas para realizar uma média em cada ponto amostrado. A câmara foi introduzida nos primeiros 3 cm da superfície do solo para não permitir a entrada de ar na interface solo-atmosfera. Os dados registrados pelo aparelho (em ppm) foram multiplicados por 6,312 para obter os resultados em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ que é a unidade mais comumente utilizada. Foram realizadas medidas simultâneas da temperatura do solo, usando um termômetro digital com sonda de aço inoxidável; e da temperatura do ar com um termômetro digital.

Análises estatísticas

Análises de variância (ANOVA) “Two Way” foram realizadas para comparar os efeitos dos tratamentos (TPI, ST e SA) sobre as variáveis (carbono orgânico do solo, biomassa microbiana, respiração do solo, produção de liteira e camada de liteira) e o período (chuvoso, seco e seco-chuvoso). Para os dados que apresentaram diferenças significativas, foi aplicado o teste de Tukey a nível de 5 % de significância. Foram realizadas análises de componentes principais (PCA) para identificar todas as possíveis relações existentes entre as variáveis estudadas. A partir da análise PCA, foram realizadas regressões múltiplas usando os dados dos fluxos de CO₂ (variável dependente) e os valores dos eixos 1, 2 e 3 resultantes da ordenação do PCA (variáveis independentes), para identificar as possíveis variáveis que afetam a dinâmica da matéria orgânica. Os dados não foram transformados pois apresentaram distribuição considerada normal.

Resultados

Umidade e temperatura do solo e do ar

A média anual da umidade do solo nos solos adjacentes (26 %) foi maior do que nas TPI e ST (19%) (ANOVA, $F= 7,8$; $p< 0,01$), Também apresentou influência sazonal (ANOVA, $F= 3,52$; $p< 0,05$), sendo maior no período chuvoso e seco-chuvoso do que no período seco (Tabela 2).

A temperatura do solo foi similar nos três tipos de solos, com temperaturas médias anuais de 25,6 °C na TPI; 25,3 °C no ST e 25,1 °C no SA. Entretanto, a temperatura do solo apresentou variação sazonal significativa ($p< 0,05$), sendo a temperatura maior nas épocas seca e seca-chuvosa do que na chuvosa (Tabela 2).

A temperatura do solo foi similar nos três tipos de solos, com temperaturas médias anuais de 30,1 °C na TPI; 30,5 °C no ST e 29,5 °C no SA. Entretanto, a temperatura do solo apresentou variação sazonal significativa ($p< 0,05$), sendo a temperatura maior nas épocas seca e seca-chuvosa do que na chuvosa (Tabela 2).

Tabela 2 Umidade e temperatura dos solos de Terra Preta do Índio, solos de transição e solos adjacentes em diferentes períodos climáticos. Os valores são médias de cinco réplicas com seus desvios-padrão. As letras maiúsculas diferentes representam as diferenças entre os tratamentos e as minúsculas entre os períodos climáticos

Tipo solo	Período	Umidade solo (%)	Temperatura solo (°C)	Temperatura do ar (°C)
Terra preta	chuvosa	22,3± 5,6 Aa	24,8± 1,1 Aa	29,1 ± 0,7 Aa
	seca	15,0± 3,7 Ab	26,0± 1,3 Ab	31,6 ± 3,1 Ab
	seca-chuvosa	19,1± 4,5 Ab	25,9± 0,9 Ab	29,7± 1,2 Aa
S. transição	chuvosa	21,4± 3,3 Aa	24,0± 2,2 Aa	29,1 ± 1,0 Aa
	seca	17,7± 6,1 Ab	26,2± 0,8 Ab	32,2 ± 1,2 Ab
	seca-chuvosa	18,9± 4,1 Ab	25,7± 0,8 Ab	30,3± 1,2 Aa
S. adjacente	chuvosa	27,6± 4,7 Aa	24,2± 1,5 Aa	29,2 ± 1,5 Aa
	seca	23,3± 6,8 Ab	25,6± 0,7 Ab	30,1 ± 1,5 Aa
	seca-chuvosa	26,2± 7,1 Ab	25,7± 0,7 Ab	29,4± 1,4 Aa

Produção e estoque de liteira

A produção de liteira das diferentes florestas secundárias foi similar nos diferentes tipos de solo, com produção média anual de 9,2 Mg ha⁻¹ a⁻¹ nas TPI, 8,8 Mg ha⁻¹ a⁻¹ nos ST e 8,9 Mg ha⁻¹ a⁻¹ nos SA; a média mensal foi de aproximadamente 0,7 Mg ha⁻¹ nos três tipos de

solo. Entretanto, houve variação sazonal significativa (ANOVA, $F= 41,1$; $p<0,001$): a produção foi maior no período seco, com pico de produção nos meses de julho e agosto, quando acontecem as menores precipitações, e produção mais baixa nas épocas de transição seca- chuvosa e chuvosa, períodos com maiores precipitações (Figura 1).

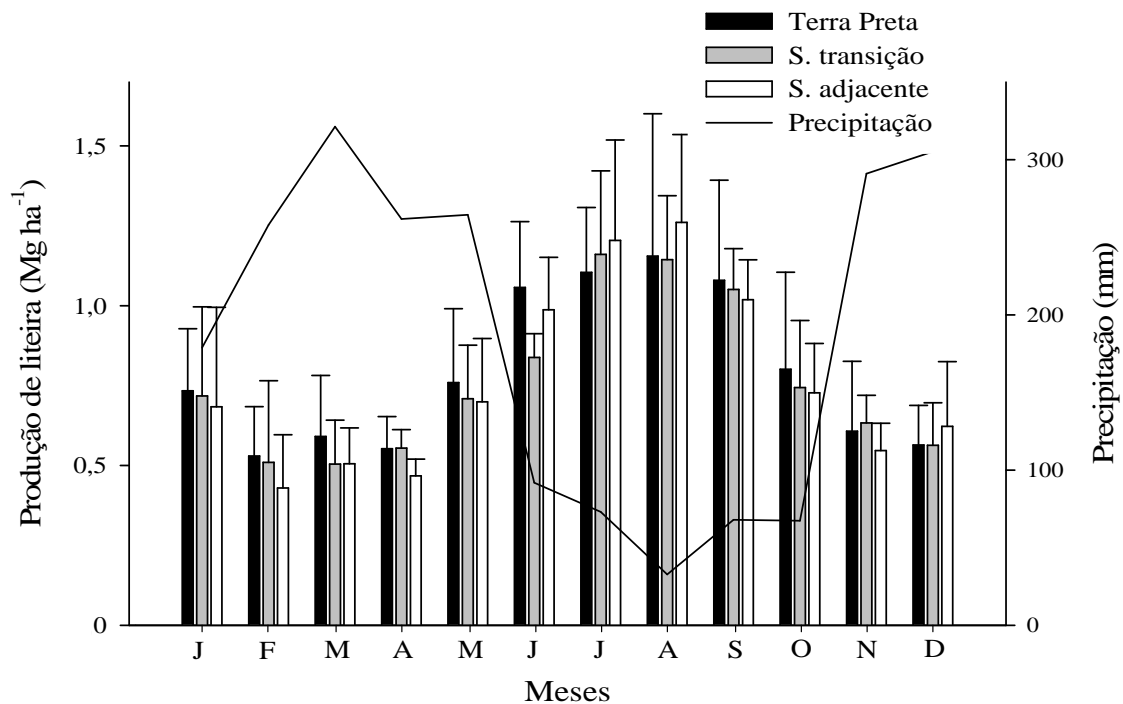


Figura 1 Produção mensal de liteira ($Mg\ ha^{-1}$) e precipitação mensal (mm) nas áreas com solos de Terra Preta do Índio, solos de transição e solos adjacentes. Os valores são médias de cinco réplicas ($n=5$) correspondentes a cinco áreas de estudo, cada uma com 10 coletores de liteira. As barras verticais representam os desvios-padrão; a linha horizontal indica a precipitação mensal

Os estoques de liteira sobre o solo foram similares nos três tipos de solo (ANOVA, $F= 0,10$; $p=0,91$). Apesar de não apresentar variação sazonal significativa (ANOVA, $F= 2,76$; $p= 0,07$), os estoques foram mais acentuados no mês de julho (início do período seco) e menor no mês de junho (final do período chuvoso). A média anual do estoque de liteira foi de $3,3\ Mg\ ha^{-1}$ nas TPI e nos SA, e $3,1\ Mg\ ha^{-1}$ nos ST (Figura 2).

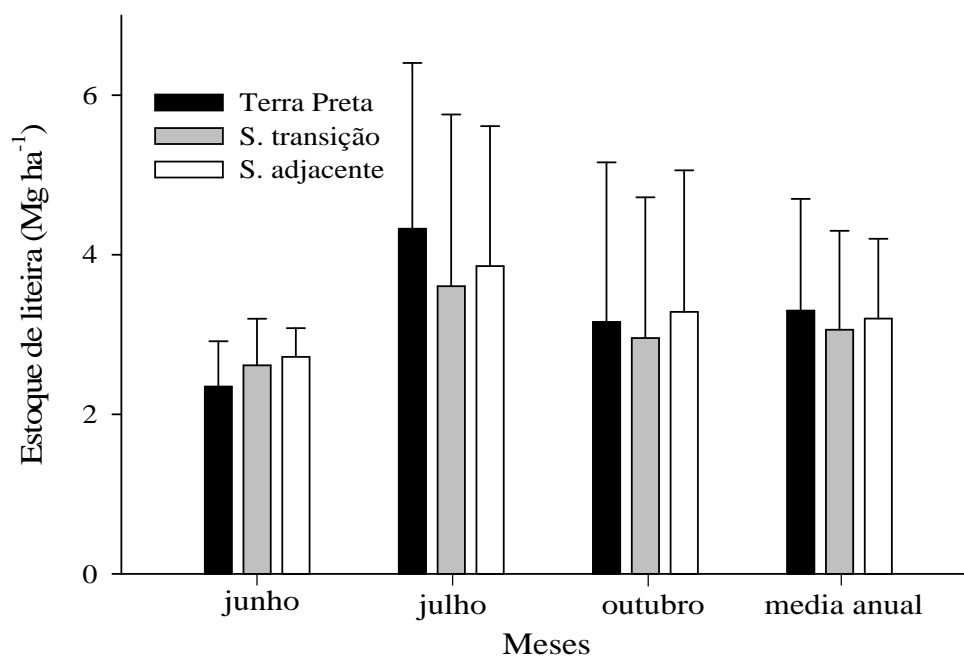


Figura 2 Estoques de liteira (Mg ha^{-1}) em diferentes meses do ano e estoque médio anual nos solos de Terra preta do Índio, solos de transição e solos adjacentes. Os valores são médias de cinco réplicas ($n= 5$) correspondentes a cinco áreas de estudo, cada uma com 5 amostras compostas de liteira; as barras verticais representam os desvios-padrão

Os coeficientes de decomposição (k_L) foram similares entre os tipos de solo estudados, todos apresentando valores > 1 ; isto indica que nestes sistemas, acontece uma rápida decomposição da liteira (Tabela 3).

Tabela 3 Valores do coeficiente de decomposição (k_L) nas Terras Pretas do Índio, solo de transição e adjacente. Os valores são médias de cinco réplicas ($n=5$) correspondentes a cinco áreas de estudo e seus respectivos desvios-padrão

Tipo de solo	Produção de liteira ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	Estoque de liteira (Mg ha^{-1})	k_L
Terra Preta	$9,2 \pm 1,7$	$3,3 \pm 1,4$	2,9
S. transição	$8,8 \pm 1,3$	$3,1 \pm 1,2$	3,0
S. adjacente	$8,9 \pm 0,6$	$3,3 \pm 1,0$	2,8

Entradas de carbono pela liteira

As entradas de carbono para o solo, provenientes da liteira fina nova produzida, foram similares entre os três tipos de solo (ANOVA, $F=0,39$; $p= 0,68$); porém, houve diferenças entre os componentes da liteira (ANOVA, $F= 496$; $p<0,001$). O componente que mais aportou carbono, em todos os tipos de solo, foi o formado pelas folhas, com uma proporção média de C de 80 % do total; o menor aporte foi encontrado no material reprodutivo, com proporção média de 7 % do total de C (Tabela 3). A entrada anual de carbono, somando todos os componentes, foi de $4,4 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ nas TPI, $4,2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ nos ST e $4,1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ nos solos adjacentes (Tabela 4).

Tabela 4 Entradas de carbono através da liteira fina nos diferentes componentes, em solos de TPI, ST e SA. Os valores são as médias de cinco réplicas, seguida dos desvios-padrão. As letras maiúsculas diferentes representam as diferenças entre os tratamentos e as minúsculas entre os componentes

Tipo solo	Componente	Produção de liteira ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	Entrada de C ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)	Proporção de C (%)
Terra Preta	Foliar	$7,1 \pm 1,3 \text{ Aa}$	$3,4 \pm 0,5 \text{ Aa}$	$77,2 \pm 3,9 \text{ Aa}$
	Lenhoso	$1,5 \pm 0,3 \text{ Ab}$	$0,7 \pm 0,1 \text{ Ab}$	$16,0 \pm 1,7 \text{ Ab}$
	Reprodutivo	$0,6 \pm 0,3 \text{ Ab}$	$0,3 \pm 0,1 \text{ Ab}$	$6,7 \pm 3,1 \text{ Ac}$
S. transição	Foliar	$7,1 \pm 1,1 \text{ Aa}$	$3,4 \pm 0,5 \text{ Aa}$	$80,6 \pm 1,0 \text{ Aa}$
	Lenhoso	$1,1 \pm 0,2 \text{ Ab}$	$0,5 \pm 0,1 \text{ Ab}$	$12,5 \pm 1,8 \text{ Ab}$
	Reprodutivo	$0,6 \pm 0,2 \text{ Ab}$	$0,3 \pm 0,1 \text{ Ab}$	$7,0 \pm 1,6 \text{ Ab}$
S. adjacente	Foliar	$6,9 \pm 0,5 \text{ Aa}$	$3,3 \pm 0,2 \text{ Aa}$	$82,1 \pm 6,4 \text{ Aa}$
	Lenhoso	$1,4 \pm 0,3 \text{ Ab}$	$0,5 \pm 0,3 \text{ Ab}$	$11,2 \pm 6,8 \text{ Ab}$
	Reprodutivo	$0,6 \pm 0,3 \text{ Ab}$	$0,3 \pm 0,1 \text{ Ab}$	$6,7 \pm 2,9 \text{ Ab}$

A qualidade da liteira foi avaliada pela análise do conteúdo de lignina e pela relação C:N, comumente usados como indicadores da qualidade do substrato vegetal. O conteúdo de lignina foi similar entre os três tipos de solo (Tabela 5); entretanto, apresentou diferenças entre os componentes (ANOVA, $F= 51,7$; $p<0,001$), sendo que as folhas, apresentaram menor conteúdo de lignina do que os materiais lenhoso e o reprodutivo (Tukey, $p<0,05$). A

relação C:N foi igual entre os três tipos de solo (Tabela 5), sendo maior no material lenhoso do que nas folhas e no material reprodutivo (ANOVA, F= 10,4; p<0,001).

Tabela 5 Qualidade química de componentes da liteira, em solos de TPI, ST e SA. Os valores são as médias de cinco réplicas, seguida dos desvios-padrão. As letras maiúsculas diferentes representam as diferenças entre os tratamentos e as minúsculas entre os componentes

Tipo solo	Componente	C total %	C:N	Lignina (%)
Terra Preta	Foliar	47,4± 2,4	30,0± 7,9 Aa	25,1± 1,7 Aa
	Lenhoso	46,8± 1,4	36,9± 13 Aa	35,7± 2,1 Ab
	Reprodutivo	46,8± 1,9	25,5± 3,8 Ab	41,8± 8,6 Ab
S. transição	Foliar	47,6± 2,0	27,6± 3,5 Aa	26,1± 2,0 Aa
	Lenhoso	45,7± 2,1	34,3± 9,2 Aa	38,1± 3,5 Ab
	Reprodutivo	47,1± 1,4	26,2± 3,7 Ab	40,6± 4,7 Ab
S. adjacente	Foliar	48,3± 1,6	29,7± 2,0 Aa	26,0± 3,0 Aa
	Lenhoso	47,2 ± 1,3	39,9± 6,1 Aa	37,9± 3,1 Ab
	Reprodutivo	48,2± 2,3	26,1± 5,3 Ab	40,7± 5,3 Ab

Mineralização do carbono

A mineralização de carbono durante a incubação de 35 dias diferiu entre os tipos de solo (ANOVA, F=5,8; p= 0,007), sendo a mineralização no final da incubação 36 % maior nos SA (309 µg C-CO₂ g solo⁻¹) e 30 % maior nos ST (281 µg C-CO₂ g solo⁻¹) do que nos solos TPI, que tiveram valores de 197 µg C-CO₂ g solo⁻¹ (Figura 3). Nos primeiros 5 dias de incubação, observou-se uma alta mineralização de C em todos os tipos de solo, com poucas diferenças entre estes; depois de 17 dias a evolução do CO₂ diminuiu, porém a diferença na mineralização dos SA e ST comparados às TPI foram marcantes, e aos 35 dias manteve-se uma evolução similar. Imprevistos nas análises das amostras impediram a obtenção dos resultados da mineralização acumulativa até os 180 dias de incubação; porém, resultados obtidos dos últimos 40 dias de incubação (dia 140 até o dia 180), mostraram que a evolução de CO₂, apesar de não apresentar diferença significativa entre os tipos de solos (ANOVA, F= 1,45; p= 0,27), continuou sendo maior nos SA (246 µg C-CO₂ g solo⁻¹) e ST (237 µg C-CO₂

g solo⁻¹) do que nas TPI (167 µg C-CO₂ g solo⁻¹).

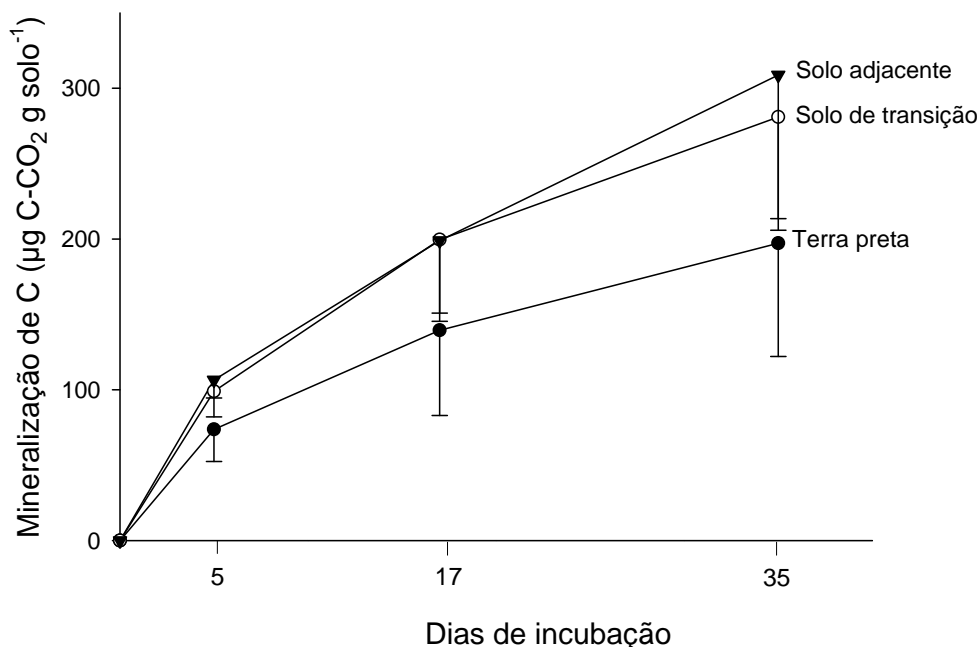


Figura 3 Mineralização acumulativa de carbono durante 35 dias de incubação nos solos Terra Preta, solo de transição e solo adjacente. Os valores são as médias de cinco réplicas. As barras verticais representam os desvios-padrão

Características bioquímicas do solo

O carbono do solo foi maior nos solos TPI do que no ST e SA (ANOVA, $F= 13,3$; $p<0,001$). O carbono da biomassa microbiana também foi maior nas TPI do que nos ST e SA (ANOVA, $F= 5,44$; $p< 0,01$) com valores médios anuais de 540 µg g solo⁻¹ nas TPI; 368 µg g solo⁻¹ nos ST e 384 µg g solo⁻¹ nos SA, apresentando influência sazonal (ANOVA, $F=11,6$; $p<0,001$); com maiores valores no período chuvoso do que nos períodos seco e seco-chuvoso (Tabela 6).

Os efluxos de CO₂ foram similares nos três tipos de solos estudados, apresentando valores médios anuais de 6,5 µmol m² s⁻¹ nas TPI; 5,3 µmol m² s⁻¹ nos ST e de 6,6 µmol m² s⁻¹ nos SA. Entretanto, os efluxos de CO₂ mudaram sazonalmente em todas as áreas (ANOVA, $F= 6,22$; $P<0,01$), encontrando-se os maiores fluxos no período seco-chuvoso e menores no período seco (Tabela 6).

Tabela 6 Características bioquímicas dos solos de Terra Preta do Índio, solos de transição e solos adjacentes nos diferentes períodos climáticos. Os valores são médias de cinco réplicas com seus desvios-padrão. As letras maiúsculas diferentes, representam as diferenças entre os tratamentos e as minúsculas entre os períodos climáticos

Tipo de solo	Período	Biomassa microbiana-C ($\mu\text{g g solo}^{-1}$)	Fluxos de CO_2 ($\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$)
Terra Preta	chuvoso	749 \pm 280 Aa	6,6 \pm 1,2 Aab
	seco	448 \pm 236 Ab	5,3 \pm 1,9 Aa
	seco-chuvoso	424 \pm 118 Ab	7,5 \pm 1,6 Ab
S. transição	chuvoso	516 \pm 160 Ba	5,7 \pm 1,5 Aab
	seco	297 \pm 28 Bb	4,3 \pm 1,4 Aa
	seco-chuvos	290 \pm 79 Bb	6,0 \pm 1,5 Ab
S. adjacente	chuvoso	508 \pm 191 Ba	6,6 \pm 0,6 Aab
	seco	342 \pm 64 Bb	5,7 \pm 1,5 Aa
	seco-chuvoso	301 \pm 52 Bb	7,4 \pm 1,3 Ab

Fatores controladores da dinâmica da M.O.S.

Os resultados das análises dos componentes principais realizada em cada tipo de solo, foram obtidos a partir de dez variáveis e 15 amostras de solo. Os valores maiores ou iguais a 0,50 foram considerados contribuidores com maior importância em cada componente (Tabela 7).

Nas Terras Pretas do Índio, os três primeiros componentes explicaram 71 % da variância total dos dados, sendo que o primeiro componente explicou 35 % da variabilidade, e se relacionou positivamente com a biomassa microbiana, porcentagem de argila e teor de carbono do solo; e negativamente com a densidade do solo, porcentagem de areia e teor de lignina da liteira. O segundo componente explicou 20 % da variância dos dados e foi relacionado positivamente com a temperatura do solo e a densidade do solo, e negativamente com o C do solo e a relação C:N da liteira. O terceiro componente explicou 16 % da variabilidade, e está relacionado positivamente com a temperatura do solo e negativamente com a densidade do solo e biomassa microbiana.

Nos solos de transição entre as TPI e os solos adjacentes, os três primeiros componentes explicaram 80 % da variância total dos dados, sendo que o primeiro componente explicou 36 %, sendo relacionado positivamente com os efluxos de CO₂, a razão C:N da liteira, a lignina da liteira e % de argila no solo, e negativamente com a densidade e a % de areia. O segundo componente explicou 28 % da variância dos dados, relacionado positivamente com os efluxos de CO₂, a umidade do solo, o C da biomassa microbiana, a lignina da liteira e a % de areia, e negativamente com a temperatura do solo, a produção de liteira e a % de argila. O terceiro componente explicou 16 % e está relacionado positivamente com a produção de liteira, e negativamente com a biomassa microbiana e o C do solo.

Nos solos adjacentes, os três primeiros componentes explicaram 71 % da variância total dos dados, sendo que o primeiro componente explicou 40 %, sendo relacionado positivamente com a % areia e a densidade do solo, e negativamente com a umidade do solo, a lignina da liteira e a % argila. O segundo componente explicou 17 % da variância, e está relacionado positivamente com os efluxos de CO₂ e a razão C:N da liteira, e negativamente com a produção de liteira. O terceiro componente explicou 14 % e está relacionado positivamente com os efluxos de CO₂, e negativamente com a umidade do solo.

Tabela 7 Peso de cada variável nos diferentes componentes principais em Terra Preta, solo de transição e solo adjacente. Valores em negrito indicam valores maiores ou iguais a 0,50, principais contribuidores da variação dentro de cada componente principal

Variável	Terra Preta			Solo transição			Solo adjacente		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
Efluxos de CO ₂	-0,32	-0,45	-0,47	0,69	0,53	0,13	0,27	0,85	0,59
Biomassa microb-C	0,50	0,28	-0,60	0,00	0,51	-0,69	-0,45	0,11	0,08
Umidade do solo	0,25	0,44	0,22	0,49	0,60	-0,03	-0,75	-0,03	-0,77
Temperatura do solo	0,32	0,54	0,75	-0,44	-0,57	0,34	0,07	0,12	-0,47
Produção de liteira	0,28	0,39	-0,11	-0,22	-0,61	0,57	0,15	-0,70	-0,20
C:N da liteira	-0,20	-0,77	0,02	0,89	0,32	0,01	0,25	0,64	-0,07
Lignina da liteira	-0,58	0,32	-0,07	0,75	0,64	0,49	-0,90	0,11	0,17
% argila	0,96	0,09	0,10	0,62	-0,68	-0,38	-0,96	0,02	0,33
Densidade do solo	-0,81	0,52	-0,62	-0,79	0,23	0,20	0,87	-0,24	0,08
Carbono do solo	0,56	-0,60	0,22	0,25	0,48	-0,61	-0,34	-0,31	-0,29
Var. explicada (%)	35	20	16	36	28	16	40	17	14

Para cada tipo de solo foram plotados somente os componentes PC1 e PC2 para facilitar a visualização das posições das variáveis no plano, e as possíveis relações entre as variáveis em cada tipo de solo (Figura 4).

Em regressões múltiplas lineares realizadas entre os fluxos de CO₂ e os valores dos eixos dos componentes PC1, PC2 e PC3, para encontrar os possíveis fatores que influenciam a dinâmica da matéria orgânica, estes foram relacionados com o componente principal 2, onde a temperatura do solo e a textura (% argila) foram os fatores que mais influenciaram esta dinâmica em todos os tipos de solos ($r^2 = 0,25$; $p=0,009$). Quando foram realizadas as regressões com os valores dos componentes para cada tipo de solo, observou-se que nas TPI a dinâmica não apresentou relação significativa com algum componente principal ($r^2 = 0,23$; $p= 0,40$); porém, no gráfico das relações entre as variáveis definidas pelos componentes (Figura 4), observou-se que a temperatura do solo pode ser um fator importante influenciando a dinâmica da MOS. Os solos de transição foram relacionados com o componente principal 1 e 2, sendo relacionados com a temperatura do solo, a textura (% argila), a umidade do solo e o CN da liteira ($r^2 = 0,63$; $p=0,01$). Nos solos adjacentes, os fluxos de CO₂ não tiveram relação com nenhum componente principal ($r^2 = 0,13$; $p = 0,66$). Porém, no gráfico das relações entre as variáveis definidas pelos componentes principais, o C:N da liteira e a temperatura do solo encontram-se ordenadas no mesmo eixo (PC2), influenciando de forma menos importante os fluxos de CO₂ (Figura 4).

No gráfico das relações entre variáveis definidas pelo componente principal 1 (PC1) e o componente principal 2 (PC2), observaram-se os principais fatores que influenciaram todos os tipos de solos estudados, sendo importantes a temperatura do solo e a textura do solo; a umidade do solo mostrou ser um importante fator influenciando a biomassa microbiana, porém, estas relações não foram significativas ($p > 0,05$) (figura 4).

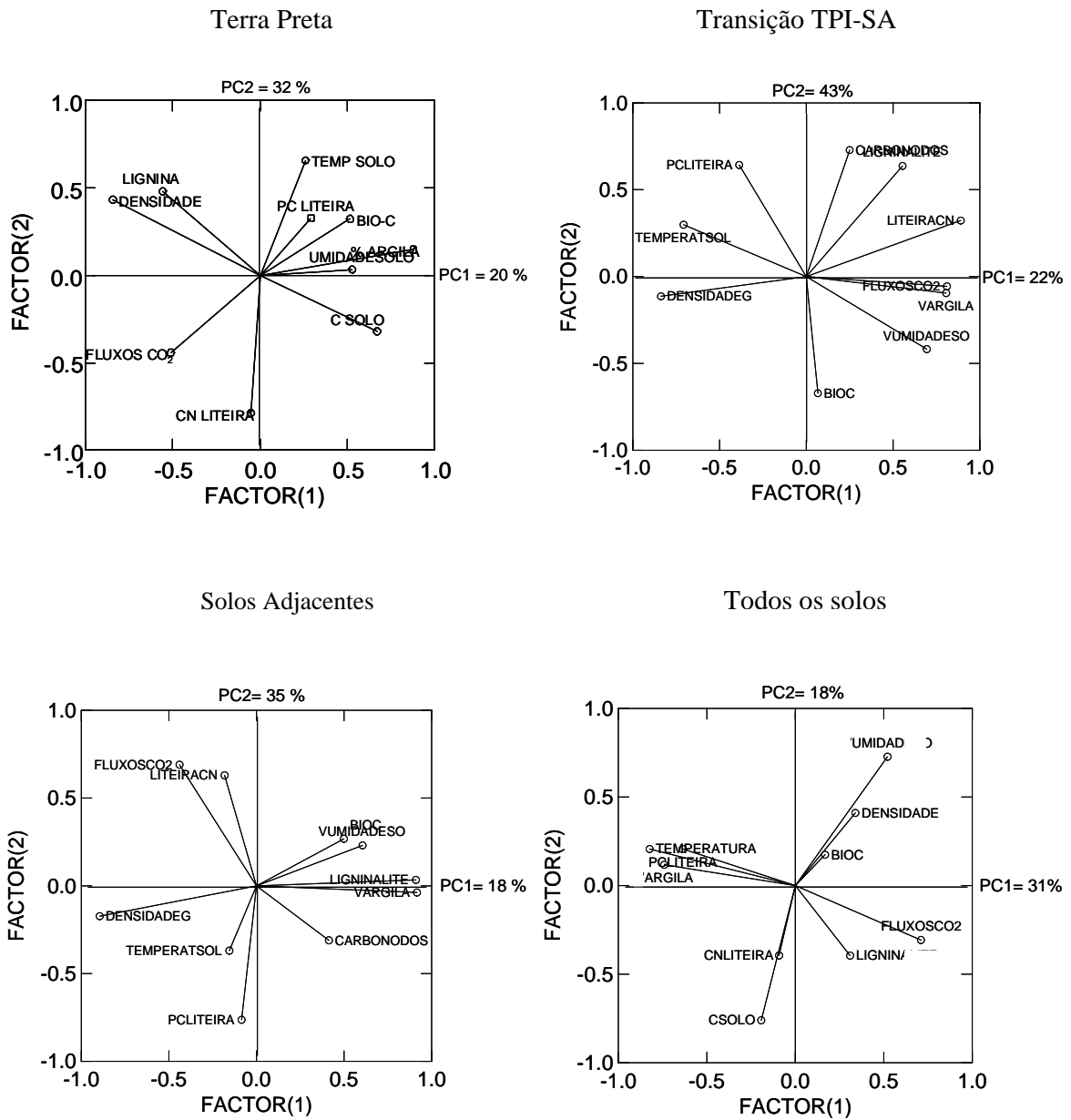


Figura 4 Gráfico das relações entre variáveis definidas pelo componente principal 1 (PC1) e o componente principal 2 (PC2).

Discussão

Dinâmica da matéria orgânica

Em condições naturais de floresta secundária, a dinâmica da matéria orgânica foi sensível às condições de sazonalidade. Entre os tipos de solo, as TPI e os SA, apresentam uma dinâmica similar, exceto em relação à biomassa microbiana e ao teor de carbono orgânico do solo, que apresentaram valores maiores nos solos TPI. Na época chuvosa, o aumento da umidade do solo favoreceu à proliferação e a atividade dos microrganismos no solo e apresenta uma alta mineralização de C. Por outro lado, na época seca o baixo teor de umidade limita os processos bioquímicos no solo. A respiração do solo apresenta uma variação sazonal em ecossistemas amazônicos de floresta e pastagem (Luizão et al., 1992); com correlações positivas entre os fluxos de CO₂ e a umidade do solo (Davidson et al., 2000; Chambers et al., 2004); um trabalho em florestas tropicais da Península da Malásia também mostrou estas relações (Adachi, 2006).

Em condições controladas de temperatura e umidade no laboratório, os fluxos de CO₂ do solo sem adição de material orgânico, são menores nas TPI do que nos ST e SA. Isto é atribuído possivelmente à composição quimicamente recalcitrante do carvão contido nas Terras Pretas que é de difícil degradação. Nestes solos, a quantidade de carvão é de aproximadamente 35 %, enquanto que solos adjacentes geralmente apresentam 14% (Glaser, 2002). Desta forma, a baixa mineralização de carbono, observada em solos de TPI, é atribuída à alta estabilidade do carbono orgânico (Glaser, 1999, 2000). Em similares condições, Liang et al. (2008), encontraram lenta mineralização do C em solos ricos em carbono preto (carvão) com adição de liteira, concluindo que essa fração de C total afeta a ciclagem do carbono orgânico do solo e o carbono labelo, tornando a ciclagem mais lenta. Por outro lado, Hamer et al. (2004) mostraram que o carbono preto em solos pode promover o crescimento dos microrganismos e a decomposição do carbono lábil. Wardle et al., (2008) relataram perdas de húmus em função da presença de carvão no solo sob floresta boreal. No entanto, precisa-se contabilizar também as perdas de massa do carvão (Lehmann & Sohi, 2008). Além disso, em experimentos de incubação, não foram encontradas evidências de que o material vegetal queimado seja significativamente utilizado pela população microbiana (Shindo, 1991),

Neste estudo, foram encontradas duas situações diferentes: em condições controladas, sem adição de liteira, a mineralização de carbono nas TPI é lenta comparada aos solos adjacentes; e em condições naturais, a respiração do solo é similar à dos solos adjacentes. Isto

possivelmente e deve à ausência da liteira como principal fonte de C no estudo em laboratório. Nessas condições, os microrganismos provavelmente obtiveram energia através da degradação do carbono já estabilizado, com alto conteúdo de carvão e de lenta mineralização. No ambiente natural, os microrganismos prefeririam a matéria orgânica lábil (liteira), de fácil decomposição, para a obtenção de energia. Mesmo em solos de Terra Preta ricos em carvão, este não está impedindo a mineralização da matéria orgânica recente (liteira), o que é fundamentado pelas constantes de decomposição (k_L) similares tanto nas TPI como nos SA. Isto pode indicar que o carvão contido nas TPI sob cobertura florestal, influencia unicamente a mineralização do carbono estabilizado, que se encontra estocado há centenas ou milhares de anos no solo. Porém, não houve evidências de que a presença de carbono estabilizado nas TPI afete o carbono novo que está entrando no sistema, através da liteira das plantas. Outros estudos recentes realizados por Ribeiro, (2006) nas mesmas áreas de estudo, mostraram constantes de decomposição (K_L) sendo maiores nas TPI e ST comparadas com os SA; sendo atribuída à melhor qualidade nutricional da liteira nas Terras Pretas do Índio.

Ainda não ficou claro porquê, em experimentos realizados em condições controladas com adição de liteira, em condições de laboratório, a mineralização de C do solo e da matéria orgânica nova é menor nos solos ricos em carvão do que nos solos adjacentes. Isto pode estar associado a outros fatores que influenciariam diretamente a decomposição do carbono novo, como a atividade da biomassa das raízes, que não foi quantificada em condições controladas e nem em condições naturais nos solos de Terra Preta; neste trabalho foi medido em condições naturais, a respiração total do solo, e não isoladamente a respiração dos microrganismos. Algumas pesquisas realizadas em ecossistemas florestais, mostram a relação entre a rizosfera e a atividade microbiana, sendo também afetada por fatores climáticos e químicos (Zech, 1997), especialmente a umidade e o carbono do solo (Adachi, 2006). Steiner (2007) encontrou que a adubação com carvão aumenta o estoque de nutrientes nas raízes, reduz a lixiviação de nutrientes e melhora a produção de biomassa.

Outros possíveis fatores que não foram quantificados são a dinâmica do carbono orgânico dissolvido proveniente da matéria orgânica lábil influenciando sobre a grande população de microrganismos e sua atividade nas TPI. Van Hees et al. (2005) encontraram relação entre o carbono orgânico dissolvido e a atividade microbiana, que pode contribuir para o fluxo total de CO_2 do solo. Também é importante avaliar a contribuição da macrofauna na decomposição da liteira nestes solos, por estar associada aos processos de decomposição e ciclagem de C e nutrientes no solo (Tapia-Coral, 2004). Fatores como atividade da rizosfera,

macrofauna do solo e carbono orgânico dissolvido podem estar contribuindo para a diferenciação dos resultados, quando comparamos os ambientes naturais e os experimentos controlados em laboratório; portanto, são necessários mais estudos, incluindo estes parâmetros, para entender melhor a dinâmica da matéria orgânica do solo nestes sistemas.

A população microbiana foi maior nas TPI do que nos ST e adjacentes, porém a mineralização do C foi similar, o que indica que nas terras pretas existe uma grande população microbiana; porém, esta seria menos ativa do que nos solos adjacentes. O carbono preto das TPI pode favorecer o crescimento da biomassa microbiana, pela grande quantidade de C estável estocado nestes solos; os microrganismos utilizariam a superfície porosa do carvão como refúgio (Liang et al., 2008; O'Neill, 2006). Porém, faltam estudos direcionados aos efeitos dos solos ricos em carbono preto sobre o desenvolvimento da biomassa microbiana e como estes solos influenciam a atividade dos microrganismos.

Fatores controlando a dinâmica da MOS

Os fatores que influenciaram a dinâmica da matéria orgânica nos três tipos de solos foram principalmente a sazonalidade, a temperatura do solo e a textura do solo (% argila). Quando a temperatura do solo foi maior, o efluxo de CO₂ foi menor; esta relação deve possivelmente ao aumento da umidade no período chuvoso nas regiões tropicais, que coincidem com as temperaturas baixas nesta região, apesar desta apresentar pouca variação ao longo do ano. Porém neste trabalho não foi encontrado um efeito significativo da umidade do solo nos fluxos de CO₂, embora a umidade do solo tenha aumentado quando a temperatura do ar foi menor; portanto os fluxos de CO₂ foram influenciados pela temperatura do solo e, conseqüentemente, pela umidade do solo. Em florestas tropicais do leste da Amazônia respiração do solo foi afetada pela sazonalidade e a umidade do solo; enquanto que a temperatura do solo teve pouca influencia sobre a emissão de CO₂ do solo, por esta ser relativamente constante na região (Davidson, 2000). Steenwerth (2008) encontrou que as mudanças na biomassa microbiana e fluxos de CO₂ são fortemente dependentes da umidade do solo, enquanto que Zech (1997) relatou que a decomposição da liteira é mediada por processos microbiológicos e controlada pela temperatura, umidade, pH e disponibilidade de nutrientes. Sendo desta forma, a ciclagem e a estabilidade da matéria orgânica dependentes de parâmetros biológicos e ambientais (Gleixne, 2001).

Por tipo de solo, nas TPI a dinâmica da matéria orgânica foi influenciada pela temperatura do solo, porém foi não significativa. Houve relação inversamente proporcional

entre a temperatura do solo e a umidade do solo, sendo estes importantes parâmetros para a atividade dos microrganismos. No entanto, a presença do carbono preto nas TPI pode ser o fator mais importante para o desenvolvimento da população microbiana, embora os mecanismos envolvidos sejam ainda pouco conhecidos. Nos ST, a temperatura, a umidade e a textura do solo (% argila) influenciaram nos fluxos de CO₂. Nestes solos, por serem mais arenosos, a textura influenciou fortemente os fluxos de CO₂, já que a matéria orgânica é menos protegida fisicamente e as perdas de C através da mineralização são maiores; a menor quantidade de carbono preto neste sistema, comparado às TPI, possivelmente diminuiu a eficiência na fixação e estocagem de carbono no solo. Nos SA, a temperatura do solo influenciou os fluxos de CO₂, porém não de forma significativa. Nestes solos, comuns em ambientes tropicais, a população microbiana é ativa e eficiente, dadas as condições climáticas e químicas favoráveis, tornando rápida a dinâmica do C.

Em todos os tipos de solo, houve uma influência indireta da produção de liteira sobre os fluxos de CO₂: quando a produção de liteira aumentou, os fluxos de CO₂ diminuíram. Esta influência pode ser explicada pelo aumento do fluxo de CO₂ no período chuvoso, quando geralmente existe forte diminuição da produção de liteira. Portanto, existiria um efeito do período climático e não da produção de liteira nestes ambientes (Jordan & Herreira, 1981). Por outro lado, o aumento da produção de liteira em florestas tropicais está associado à época seca, quando o processo de decomposição é lento (Luizão & Schubart, 1987), resultando em maior acúmulo de liteira neste período (Luizão, 1995; Tapia-Coral et al., 2005). Estudos em florestas sobre solos de TPI e SA, encontraram efeito da sazonalidade sobre a produção de liteira (Ribeiro, 2006).

Neste estudo, ainda não ficou claro qual o fator chave que contribui na dinâmica do C nos solos de TPI; portanto são ainda necessárias outras pesquisas para conhecer os efeitos do carbono preto, como o fator que poderia ser o mais importante controlador dos mecanismos de fixação de C nas terras pretas, minimizando as perdas de CO₂ para a atmosfera; e como o carbono preto afeta o crescimento dos microrganismos e a atividade microbiana. Também precisam ser determinados a influência da atividade radicular, a microfauna do solo e o carbono orgânico dissolvido na dinâmica da matéria orgânica, comparando condições naturais e controladas.

Implicações para a sustentabilidade ambiental

Os altos estoques de carbono encontrados nas TPI em comparação com os solos adjacentes e o alto potencial de retenção do carbono existentes nestes solos, mostrados neste

estudo indicam a grande importância que as TPI e a eventual Terra Preta nova produzida, podem ter na mitigação das emissões de C dos solos da Amazônia. As menores perdas de CO₂ para a atmosfera por unidade de C no solo das TPI, comparado aos solos adjacentes; mesmo quando os fluxos de CO₂ foram similares em todos os sistemas, a mineralização do carbono foi menor. Estes resultados sugerem que as TPI podem ter um papel importante na mitigação do efeito estufa.

O conhecimento mais aprofundado dos processos que envolvem a formação das Terras Pretas é essencial para o desenvolvimento de tecnologias para reproduzir novas Terras Pretas, que promovam o armazenamento do carbono atmosférico no solo e melhorem a produtividade dos solos, geralmente pobres nas regiões tropicais, contribuindo para a recuperação de áreas degradadas e a diminuição de novos desmatamentos, assim como a redução dos custos de produção dos agricultores, pela diminuição do uso de adubos químicos, especialmente os nitrogenados que também contribuem para o aumento do efeito estufa, através das emissões de óxido nitroso.

Conclusões

Em sistemas de floresta tropical, a dinâmica da matéria orgânica é sensível às condições de sazonalidade, apresentando rápida mineralização na época chuvosa e lenta na época seca. Nas Terras Pretas do Índio, solos de transição e solos adjacentes, a ciclagem do C é similar, exceto na biomassa microbiana e o teor de carbono orgânico do solo, que foram maiores nos solos TPI. Em condições controladas de temperatura e umidade, a dinâmica é mais lenta nas TPI, indicando que existem outros fatores que estão influenciando os processos de decomposição da matéria orgânica, na mesma rapidez que os solos adjacentes.

Os principais fatores que influenciaram a dinâmica da matéria orgânica nas Terras Pretas do Índio, solos de transição e solos adjacentes são a sazonalidade, a temperatura do solo e a textura do solo; sendo esta influência menor nos solos de TPI e SA e maior nos ST.

Não houve evidências de que a decomposição do carbono lábil em solos de Terra Preta do Índio sob florestas secundárias, tenha sido menor do que em solos adjacentes; e nem que o carbono lábil estimule as perdas do carbono estável estocado no solo. No entanto, a presença de carvão possivelmente estimula o crescimento da população microbiana, tornando-se esta uma importante estocadora de carbono lábil nestes sistemas.

O alto potencial de retenção do carbono encontrados nos solos de TPI, onde são menores as perdas de CO₂ para a atmosfera por unidade de C, tem importantes implicações na redução do efeito estufa e das mudanças climáticas.

Referências

- Adachi M, Bekku YS, Rashidah W, Okuda T, Koizumi H (2006) Differences in soil respiration between different tropical ecosystems. *Applied Soil Ecology* 34:258–65
- Anderson JM, Ingram JSI (1993) *Tropical Soil Biology and Fertility: a Handbook of Methods*. CAB International, Wallingford 221 pp
- Bernoux MD, Arrouays M, Cerri CC, Graça A, Volkoff B, Trieck J (1998) Estimation des stocks de carbone des sols du Rondonia (Amazonie brésilienne). *Études et Gestion des Sols* 5:31–42
- Cerri CC, Bernoux DM, Arrouays M, Feigl BJ, Piccolo MC (1999) Carbon stocks in soils of the Brazilian Amazon. In: R. Lal et al. (Ed) *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*. *Advances in Soil Science* 33-50 pp
- Chambers JQ, Tribuzy ES, Toledo LC, Crispim BF, Higuchi N, Santos J, Araújo AC, Kuijt B, Nobre AD, Trumbore S (2004) Respiration from a tropical forest ecosystem: Partitioning of source and low carbon use efficiency. *Ecological Application* 14 (4):72 – 78
- Cunha TJJ (2005) Ácidos húmicos de solos escuros da Amazônia (Terra preta de índio). Seropédica, 122 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
- Davidson EA, Verchot LV, Cattânio JH, Ackerman IL, Carvalho JE (2000) Effects of soil water content on soil respiration in forest and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry* 48:53–69
- Denevan WM (1996) A bluff bodel of riverine settlement in prehistoric Amazônia. *Annals of the Association of American Geographers* 86:654-681
- Embrapa Centro Nacional de Pesquisa de Solos (1997) *Manual de métodos de análise de solo*. Embrapa, 2^a ed. Rio de Janeiro RJ 246 p
- Feigl BJ, Sparling GP, Ross DJ, Cerri CC (1995) Soil Microbial biomass in amazonian soils: evaluation of methods and estimates of pool sizes. *Soil Biology and Biochemistry* 27: 1467-1472
- Galvinelli E, Feller C, Larré-Larrouy MC, Bacye B, Djegui N (1995) A routine method to study soil organic matter by particle-size fractionation: examples for tropical soils. *Communication Soil Science Plant Analysis* 26:1749–1760

- Glaser B (1999) Eigenschaften und Stabilität des Humuskörpers der “Indianerschwarzerden” Amazoniens. Bayreuther Bodenkundliche Berichte 68, University of Bayreuth, Germany, 196 pp
- Glaser B, Balashov E, Haumaier L, Guggenberger G, Zech W (2000) Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Organic Geochemistry* 31: 669-678
- Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, Zech W (2001) The Terra Preta phenomenon - a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* 88:37-41
- Glaser B, Lehmann J, Zech W (2002) Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in tropics with charcoal – a review. *Biology and fertility Soils* 35: 219-230
- Glaser B, Guggenberger G, Zech W, Ruivo ML (2003) Soil organic matter stability in amazonian dark earths In: Lehmann J, Kern DC, Glaser B, Woods WI (eds.), 141-158 pp. *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Gleixner G, Czimzick CJ, Kramer C, Luhker B, Schmidt MW (2001) Plant compounds and their turnover and stabilization as soil organic matter In: Schulze ED, Harrison SP, Heimann M, Holland EA, Lloyd J, Prentice IC, Schimel D (eds), 201-205 pp. *Global Biochemical Cycles in the Climate System*. Academic press, San Diego, USA.
- Hamer U, Marschener B, Brodowski S, Amelung W (2004) Interactive priming of black carbon and glucose mineralization. *Organic Geochemistry* 35:823-830
- Jordan CF, Herreira R (1981) Tropical rain forests: are nutrient really critical. *The American Naturalist* 117(2):167-180
- Kern DC, Kämpf N (1989) Antigos Assentamentos indígenas na formação de solos com terra preta arqueológica na região de Oriximina, Pará. *Revista Brasileira de Ciência de Solo* 13:219-225.
- Krull E, Baldock J, Skjemstad J (2001) Soil texture effects on decomposition and soil carbon storage In: Kirschbaum M, Mueller R (eds) pp 103-110. *Net Ecosystem Exchange*, Canberra: Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting.
- Lehmann J, Kern DC, Glaser B, Woods WI (2003) *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 505 p
- Lehmann J, da Silva Jr. JP, Steiner C, Nehls T, Zech W, Glaser B (2003) Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249:343-357

- Lehmann J, Gaunt J, Rondon M (2006) Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems-A review. *Mitigation and adaptation strategies for global change* 11:403–427
- Lehmann J, Sohi S (2008) Comment in “Fire-derived charcoal causes loss of forest humus”. *Science* 321:1295
- Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, O'Neill B, Skjemstad JO, Thies J, Luizão FJ, Petersen J, Neves EG (2006) Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1719-1730
- Liang B, Lehmann J, Solomon D, Sohi S, Thies JE, Skjemstad JO, Luizão FJ, Engelhard M, H, Neves E, Wirick S (2008) Stability of biomass-derived black carbon in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72:6069–6078
- Liang B, Lehmann J, Sohi S, Thies JE, O'Neill B, Trujillo L, Gaunt J, Solomon D, Grossman J, Neves EG, Luizão FJ (2009) Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. (no prelo).
- Lima HN, Schaefer CE, Mello JW, Gilkes RJ, Ker JC (2002) Pedogenesis and pre-colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. *Geoderma* 110:1-7
- Lucas Y, Luizão FJ, Chauvel A, Rouiller J, Nahon D (1993) The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition in soils. *Science* 260:521-523
- Lugo AE, Brown S (1993) Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. *Plant and Soil* 149:27–41
- Luizão FL, Schubart H (1987) Litter production and decomposition in a terra-firme forest of Central Amazonia. *Experimentia* 43:259-265
- Luizão RCC, Bonde TA, Rosswall T (1992) Seasonal variation of soil microbial biomass – the effects of clearfelling a tropical rainforest and establishment of pasture in the central Amazon. *Soil Biology and Biochemistry* 24(8):805–813
- Luizão FJ (1995) Ecological studies in contrasting forest types in central Amazonia. PhD. Dissertation. 288 p. University of Stirling, Scotland, UK.
- Major J, Ditommaso A, Lehmann J, Falcão N (2005) Weed dynamics on Amazonian Dark Earth and adjacent soils of Brazil. *Agriculture, ecosystems and Environment* 11:1-12
- Madari, B.E., Sombroek, W.G., Woods, W.I. 2004. Research on the anthropogenic dark earth soils of Amazonia (Terra Preta e Terra Mulata). Could it be a solution for sustainable agricultural development in the Amazon? In: Glaser, B., Woods, W.I. (Org). *Explorations in Amazonian Dark Earths*, 1 ed. Heidelberg. Springer-Verlag pp. 169-200.
- Marris, E (2006) Putting the carbon back: Black is the new green. *Nature* 444:624–626

- Mazzarino MJ, Szott L, Jimenez M (1993) Dynamics of soil total C and N, microbial biomass, and water – soluble C in tropical agroecosystems. *Soil Biology and Biochemistry* 25(2):205–214
- Moraes JL, Cerri CC, Melillo JM, Kicklighter D, Neill C, Skole DL, Steudler P (1995) Soil carbon Stocks of the Brazilian Amazon basin. *Soil Science Society of America* 59(1):244–247
- Moreira, A. Fertilidade, material orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia ocidental. *Bragantia* 66(2):307-315.
- Neill C, Cerri CC, Melillo BJ, Feigl BJ, Steudler PA, Moraes JF, Piccolo MC (1997) Stocks and dynamics of soil carbon following deforestation for pasture in Rondônia In: R. Lal et al. (Ed) 9-28 p. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- O’Neill B (2006) Microbial communities in Amazonian Dark Earth soils analyzed by culture-based and molecular approaches. MSc. Thesis, Cornell University, Ithaca, NY
- Parton WJ, Schimel DS, Cole CV, Ojima DS (1987) Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal* 51:1173-1179
- Paul S, Flessa H, Veldkamp E, López-Ulloa M (2008) Stabilization of recent soil carbon in the humid tropics following land use changes: evidence from aggregate fractionation and stable isotope analyses. *Biogeochemistry* 87:247–263
- Petersen JB, Neves E, Heckenberger, MJ (2001) Gift from the past: Terra Preta and prehistoric amerindian occupation in Amazonia. In: McEwan C, Barreto C, Neves EG, (eds.). *Unknown Amazon*. The British Museum Press, London pp. 86-105
- Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ, Stangenberger AG (1982) Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298:156–159
- Ribeiro G (2006) Produção e teor de nutrientes da liteira fina de capoeiras em Terra Preta Índio e solos adjacentes. Dissertação de mestrado, INPA, pp. 98
- Shang C, Tiessen H (1997) Organic matter lability in a tropical oxisol: Evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density and magnetic fractionations. *Soil Science* 162:795–807
- Schlesinger WH (1999) Carbon sequestration in soils. *Science* 284: 2095
- Schmidt MWI, Skjemstad JO, Gehrt E, Kögel-Knabner I (1999) Charred organic carbon in German chernozemic soils. *European Journal of Soil Science* 50:351-365
- Schmidt M, Noack A (2000) Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biochemical Cycles* 14(3):777-793

- Schmidt MWI, Skjemstad JO, Jager C (2002) Carbon isotope geochemistry and nanomorphology of soil black carbon: Black chernozemic soils in central Europe originate from ancient biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles* 16:1123
- Schubart H.; Franken W.; Luizão F. J. 1984. Uma floresta sobre solos pobres. *Ciência hoje*, 2(10): 26-33 p.
- Skjemstad JO, Clarke P, Taylor JA, Oades JM, McClure SG (1996) The chemistry and nature of protected carbon in soil. *Australian Journal Soil Research* 34:251–271
- Skole D, Tucker C (1993) Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978. *Science* 260:1905–1910
- Silveira MI, KERN DC, OLIVEIRA ER, FRAZÃO, FJL (2007) Seriam as Terras Pretas Arqueológicas grandes áreas contínuas? O caso dos sítios Bitoca 1 e Bitoca 2 na região de Carajás-PA In: *Anais do XI Congresso da Sociedade Brasileira de Estudos do Quaternário-ABEQUA*. Museu Goeldi, Belém, PA, Brasil
- Six, J., Elliot, E.T, Paustian, K., Doran, J.W. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 62:1367-1377.
- Sohi SP, Mahieu N, Arah JRM, Powlson DS, Madari B, Gaunt JL (2001) A Procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1121-1128
- Sombroek W (1966) Amazon Soils – a reconnaissance of soils of the Brazilian Amazon region. Centre for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen, Netherlands, 292 p
- Sombroek WG, Nachtergaele FO, Hebel A (1993) Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio* 22:417-426
- Steenwerth K, Belina KM (2008) Cover crops enhance soil organic matter, carbon dynamics and microbial function in a vineyard agroecosystem. *Applied soil ecology* 40:359–369
- Steiner C, Teixeira WG, Lehmann J, Zech W (2004) Microbial response to charcoal amendments of highly weathered soils and Amazonian Dark Earths in Central Amazonia – Preliminary results. In: Glaser, B. Woods, W.I. (Eds.), 195–212 pp. *Amazonian Dark Earths: Explorations in Time and Space*, Springer, Berlin, Germany,
- Steiner C, Teixeira WG, Lehmann J, Vasconcelos JL, Blum WE, Zech W (2007) Long term of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant Soil* 291:275–290
- Swift MJ, Anderson JM (1989) Decomposition. *Tropical Rain Forest Ecosystems*. Lieth, H.; Werger, M.J.A. (eds) 547–569 p. Elsevier, Amsterdam

- Tapia-Coral SC (2004) Macrovertebrados do solo e estoques de carbono e nutrientes em diferentes tipos de vegetação de Terra firme na Amazônia peruana. Tese de doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia – INPA 138 pp
- Tapia-Coral S, Luizão FJ, Wendelli E, Fernandez EC (2005) Carbon and nutrient stocks in the litter layer of agroforestry systems in central Amazonia, Brazil. *Agroforestry Systems* 65:33-42
- Thies JE, Suzuki K (2003) Amazonian Dark Earths: biological measurements. In: Lehmann J, Kern DC, Glaser B, Woods WI (eds.) *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands 287-332 pp
- Tiessen H, Cuevas E, Chacon P (1994) The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* 371:783–785
- Trumbore SE, Davidson EA, Camargo PB, Nepstad DC, Martinelli LA (1995) Below ground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. *Global Biochemical Cycles* 9:515–528
- Vance ED, Brookes PC, Jekinson DJ (1987) An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* 19(6):703-707
- Van Hees PAW, Jones DL, Findlay R, Godbold DL, Lundstrom US (2005) The carbon we do not see—the impact of low molecular weight compounds on carbon dynamics and respiration in forest soils: a review. *Soil Biol. Biochem.* 37:1–13
- Wardle DA, Nilsson M-C, Zackrisson O (2008) Fire-derived charcoal causes loss of forest humus. *Science* 320: 629
- Whitman, W.B., Coleman, D.C. and Wiebe, W.J. 1998. Prokaryotes: The unseen majority. *Proceeding of the National Academy of Science USA* 95:6578-6583.
- Witt C, Gaunt JL, Galicia CC, Ottow JC, Neue H. 2000. A rapid chloroform-fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon and nitrogen in flooded rice soils. *Biol. Fertil. Soils* 30:510-519
- Woods WI, McCannm JM (1999) Antropogenic origin and persistence of Amazonian dark earths. *Yearbook of the Conference of Latin Americanist Geographers* 25:7–14
- Zech W, Guggenberger G, Zalba P, Peinemann N (1997) Soil organic matter transformation in Argentinian Hapludolls, *Z. Pflanzenernaehr Bodenkd* 160:563–571

Considerações finais

As Terras Pretas do Índio apresentaram alto estoque do carbono no solo. Porém, não houve evidências de acúmulo de carbono recente proveniente da liteira fina. A maior proporção de carbono orgânico esteve associada às frações mais finas, silte e argila, evidenciando a importância dos mecanismos de proteção física na estabilização do C nestes solos.

Em sistemas de floresta tropical, a dinâmica da matéria orgânica é sensível às condições de sazonalidade, apresentando rápida mineralização na época chuvosa e lenta na época seca em todos os tipos de solo estudados. Em condições controladas de temperatura e umidade, a dinâmica é mais lenta nas TPI, indicando que existem outros fatores que estão influenciando os processos de decomposição da matéria orgânica, na mesma rapidez que os solos adjacentes.

Os principais fatores avaliados neste trabalho, que influenciam a dinâmica da matéria orgânica nas TPI, ST e SA são: a sazonalidade, a temperatura e a textura do solo, sendo importantes para o desenvolvimento da população microbiana e a mineralização do carbono no solo.

Não houve evidências de que a decomposição do carbono lábil em solos de Terra Preta do Índio sob florestas secundárias, tenha sido menor do que em solos adjacentes; e nem que o carbono lábil estimule as perdas do carbono estável estocado no solo. Mas, a presença de carvão possivelmente estimula o crescimento da população microbiana, tornando-se esta uma importante estocadora de carbono lábil nestes sistemas.

O alto potencial de retenção do carbono encontrados nos solos de TPI, onde são menores as perdas de CO₂ para a atmosfera por unidade de C, tem importantes implicações na redução do efeito estufa e das mudanças climáticas.

Apêndice

Tabela A1. Precipitação mensal e anual (mm) de cada local de estudo.

Mês	Encontro Águas	Lago Grande	Rio Preto (mm)	Autaz Mirim	Rio Urubú
Janeiro	176,3	173,0	274,9	144,2	125,9
Fevereiro	346,4	254,8	273,7	141,3	273,7
Março	262,3	276,5	307,8	309,8	450
Abril	252,1	252,1	252,6	243,1	308,7
Mai	382,1	323,7	201	214,6	201
Junho	87,0	63,0	121	127,0	61,1
Julho	71,6	90,8	80,8	79,0	43,2
Agosto	16,7	14,8	40,4	63,4	28,3
Setembro	32,8	32,8	80	104,1	90
Outubro	66,0	109,7	20,9	46,9	93,4
Novembro	294,0	294,0	294	278,6	294
Dezembro	317,4	255,1	317,4	318,7	317,4
Total anual	2304,7	2140,3	2264,5	2070,8	2286,7



Terra Preta do Índio



Solo de transição



Solo adjacente

Figura A2. Fotos de perfis de solo nas Terras Pretas, solos de transição e solos adjacentes nos locais de estudo, na Amazônia central.



Figura A3. Fotos de amostras de cerâmicas encontradas nas Terras Pretas do Índio, Rio Urubú, município de Rio Preto da Eva, Amazonas.



(A)



(B)

Figura A4 Fotos de florestas secundárias antigas utilizadas no estudo na área de Autaz Mirim (a), município de Careiro e Encontro das Águas (B), Manaus, Amazonas

Tabela A5. Composição granulométrica e densidade do solo nos primeiros 10 cm de profundidade, nos diferentes locais e tipos de solo.

Tipo de solo	Local	argila	silte	areia	Densidade (g cm ³)
		----- %	-----	-----	
Terra Preta	Encontro Aguas	60,5	15,9	23,6	1,1
	Lago Grande	42,0	18,3	39,7	1,0
	Autaz Mirim	19,3	15,2	65,4	1,2
	Rio Urubú	7,5	6,6	86,0	1,2
	Rio Preto	15,5	5,0	79,5	1,2
Solo transição	Encontro Aguas	19,0	7,1	73,8	1,1
	Lago Grande	36,0	8,4	55,6	1,0
	Autaz Mirim	25,5	13,9	60,6	1,2
	Rio Urubú	25,8	7,3	66,9	1,2
	Rio Preto	40,0	8,6	51,4	1,2
Solo adjacente	Encontro Aguas	74,5	11,5	14,0	1,1
	Lago Grande	28,5	10,2	61,3	1,0
	Autaz Mirim	78,5	15,8	5,7	1,2
	Rio Urubú	61,8	11,0	27,2	1,2
	Rio Preto	30,8	9,5	59,7	1,2

Tabela A6. Propriedades químicas do solo nos diferentes locais e tipos de solo

Local	Tipo de solo	profundidade	C	N	P disponível	K
			%	%	(mg kg ⁻¹)	(cmol kg)
Encontro Aguas	TPI	0-10	3,9	0,19	112,3	0,08
	TPI	10-20	2,5	0,19	96,3	0,04
	TPI	20-40	1,9	0,11	144,7	0,04
	TPI	40-70	1,5	0,07	167,7	0,02
	TPI	70-100	0,9	0,06	110,9	0,02
	ST	0-10	2,2	0,16	26,0	0,09
	ST	10-20	1,1	0,10	49,5	0,03
	ST	20-40	0,6	0,07	47,8	0,03
	ST	40-70	0,3	0,04	46,9	0,02
	ST	70-100	0,3	0,03	46,5	0,01
	SA	0-10	2,5	0,19	7,1	0,06
	SA	10-20	2,2	0,18	4,7	0,07
	SA	20-40	1,7	0,09	2,7	0,04
	SA	40-70	0,8	0,09	1,0	0,02
SA	70-100	0,6	0,05	0,7	0,01	
Lago Grande	TPI	0-10	5,1	0,36	900,6	0,14
	TPI	10-20	4,7	0,29	1583,7	0,04
	TPI	20-40	2,7	0,20	195,2	0,03
	TPI	40-70	2,5	0,14	1121,4	0,03
	TPI	70-100	1,3	0,08	492,9	0,04
	ST	0-10	2,6	0,18	62,7	0,03
	ST	10-20	1,5	0,12	95,4	0,02
	ST	20-40	1,1	0,09	72,4	0,01
	ST	40-70	0,8	0,07	83,8	0,02
	ST	70-100	0,7	0,07	78,6	0,03
	SA	0-10	2,0	0,15	1,8	0,06
	SA	10-20	1,5	0,11	1,0	0,03
	SA	20-40	1,2	0,08	0,7	0,01
	SA	40-70	0,8	0,06	0,9	0,21
SA	70-100	0,7	0,06	1,0	0,01	
Rio Preto	TPI	0-10	2,6	0,17	4,7	0,03
	TPI	10-20	1,9	0,13	3,8	0,04
	TPI	20-40	1,9	0,12	2,0	0,01
	TPI	40-70	0,8	0,06	1,1	0,00
	TPI	70-100	0,7	0,04	0,6	0,00
	ST	0-10	2,3	0,09	3,7	0,04
	ST	10-20	1,4	0,11	2,1	0,04
	ST	20-40	1,7	0,13	1,1	0,02
	ST	40-70	0,7	0,05	0,7	0,01
	ST	70-100	0,4	0,04	0,4	0,01
	SA	0-10	1,6	0,12	2,3	0,03
	SA	10-20	1,3	0,20	1,3	0,03
	SA	20-40	0,9	0,18	0,7	0,02
	SA	40-70	0,4	0,11	0,5	0,02
SA	70-100	0,3	0,08	0,4	0,01	
Autaz Mirim	TPI	0-10	3,0	0,13	10,9	0,07
	TPI	10-20	2,2	0,11	7,5	0,04
	TPI	20-40	2,3	0,12	3,1	0,02
	TPI	40-70	0,9	0,08	1,1	0,01
	TPI	70-100	0,5	0,05	0,7	0,00
	ST	0-10	2,9	0,13	6,4	0,05
	ST	10-20	1,8	0,13	4,7	0,04
	ST	20-40	1,8	0,12	1,8	0,02
	ST	40-70	1,1	0,05	0,9	0,02
	ST	70-100	0,4	0,04	1,0	0,01
	SA	0-10	1,4	0,12	3,1	0,06
	SA	10-20	2,5	0,08	1,6	0,04
	SA	20-40	1,8	0,07	0,8	0,03
	SA	40-70	1,1	0,04	0,4	0,01
SA	70-100	0,8	0,03	0,2	0,02	
Rio Urubú	TPI	0-10	3,8	0,14	13,2	0,03
	TPI	10-20	2,6	0,15	25,4	0,02
	TPI	20-40	3,1	0,14	80,0	0,01
	TPI	40-70	2,2	0,07	40,2	0,01
	TPI	70-100	0,6	0,04	26,6	0,01
	ST	0-10	3,2	0,17	6,0	0,03
	ST	10-20	4,4	0,21	4,1	0,03
	ST	20-40	2,4	0,13	2,1	0,01
	ST	40-70	1,4	0,08	1,2	0,01
	ST	70-100	0,7	0,06	0,7	0,01
	SA	0-10	2,5	0,18	3,5	0,05
	SA	10-20	2,4	0,16	1,8	0,02
	SA	20-40	1,5	0,13	1,1	0,02
	SA	40-70	0,8	0,06	0,5	0,01
SA	70-100	0,6	0,06	0,3	0,01	

Tabela A7. Médias das variáveis medidas em cada local de estudo e tipo de solo.

Período	Tratamento	Local	Fluxos de CO ₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	C microbiano ($\mu\text{g g solo}^{-1}$)	Umidade solo (%)	Temperatura ar (°C)	Temperatura solo (°C)	Pc liteira
Seco-chuvoso	Terra Preta	Encontro das Aguas	7,17	519,2	24,1	29,7	27,2	0,56
	Solo transição	Encontro das Aguas	4,48	260,0	13,7	31,8	27,0	0,61
	Solo adjacente	Encontro das Aguas	6,76	349,7	28,3	28,8	26,2	0,66
	Terra Preta	Lago Grande	6,22	526,2	23,8	30,1	26,5	0,8
	Solo transição	Lago Grande	4,43	224,8	17,3	31,2	26,3	0,7
	Solo adjacente	Lago Grande	7,36	234,3	16,2	31,7	26,6	0,5
	Terra Preta	Autaz Mirim	9,02	459,9	17,0	27,7	25,0	0,9
	Solo transição	Autaz Mirim	6,82	269,7	18,9	28,3	24,9	0,8
	Solo adjacente	Autaz Mirim	7,75	354,2	32,6	29,0	25,1	0,4
	Terra Preta	Rio Urubú	5,67	242,1	14,7	29,5	25,1	0,4
	Solo transição	Rio Urubú	7,95	268,4	19,9	30,9	25,4	0,6
	Solo adjacente	Rio Urubú	5,91	304,0	32,0	27,3	24,8	0,6
	Terra Preta	Rio Preto	9,25	373,3	16,0	31,5	26,1	0,4
	Solo transição	Rio Preto	6,33	429,2	25,0	29,3	25,3	0,6
	Solo adjacente	Rio Preto	9,36	266,2	21,7	30,0	25,7	0,6
Chuvoso	Terra Preta	Encontro das Aguas	6,43	1218,8	26,7	28,9	25,1	0,6
	Solo transição	Encontro das Aguas	4,14	766,9	19,4	29,6	25,1	0,3
	Solo adjacente	Encontro das Aguas	7,02	792,9	30,8	30,9	25,3	0,5
	Terra Preta	Rio Urubú	6,70	673,8	15,2	29,5	25,0	0,5
	Solo transição	Rio Urubú	6,68	360,8	18,6	27,7	24,1	0,6
	Solo adjacente	Rio Urubú	6,25	327,8	26,5	27,3	23,1	0,6
	Terra Preta	Autaz Mirim	8,06	761,4	21,1	30,1	26,1	0,4
	Solo transição	Autaz Mirim	6,31	511,7	23,4	30,1	25,4	0,5
	Solo adjacente	Autaz Mirim	5,92	504,6	34,0	30,2	25,4	0,3
	Terra Preta	Rio Preto	7,09	595,5	19,3	28,7	23,1	0,7
	Solo transição	Rio Preto	7,35	546,4	26,4	28,6	20,0	0,5
	Solo adjacente	Rio Preto	6,53	576,0	24,0	28,2	22,0	0,6
	Terra Preta	Lago Grande	4,85	494,6	29,2	28,5	25,2	0,9
	Solo transição	Lago Grande	3,93	394,6	19,4	29,6	25,4	0,7
	Solo adjacente	Lago Grande	7,39	339,3	22,7	29,3	25,2	0,6
Seco	Terra Preta	Lago Grande	3,38	543,0	17,9	35,8	27,0	1,6
	Solo transição	Lago Grande	2,80	290,7	20,1	33,7	26,1	1,1
	Solo adjacente	Lago Grande	4,29	259,9	24,3	31,3	24,8	1,2
	Terra Preta	Autaz Mirim	6,68	382,8	9,3	31,0	23,9	0,9
	Solo transição	Autaz Mirim	4,27	339,4	12,3	31,8	25,3	1,2
	Solo adjacente	Autaz Mirim	4,88	435,9	25,4	30,2	25,4	1,1
	Terra Preta	Encontro das Aguas	3,17	808,0	13,4	33,3	27,2	1,2
	Solo transição	Encontro das Aguas	3,53	310,5	18,6	33,0	27,6	1,2
	Solo adjacente	Encontro das Aguas	4,98	328,8	31,1	31,4	26,6	1,0
	Terra Preta	Rio Preto	6,38	199,6	17,0	27,7	25,8	0,8
	Solo transição	Rio Preto	6,49	264,4	26,2	30,9	26,1	0,9
	Solo adjacente	Rio Preto	7,82	325,7	23,2	30,2	26,1	0,9
	Terra Preta	Rio Urubú	7,17	307,8	17,7	30,1	26,0	0,9
	Solo transição	Rio Urubú	4,48	282,1	11,3	31,5	25,8	0,9
	Solo adjacente	Rio Urubú	6,76	359,8	12,3	27,7	25,1	0,9

Tabela A8. Médias da qualidade da liteira e as entradas de carbono nos diferentes locais e tipos de solo

Local	Tratamento	Componente	Carbono (%)	C:N	Lignina (%)	Produção anual Entrada de C	
						----- (Mg ha ⁻¹) -----	
Encontro Aguas	Terra Preta	folha	47,5	19,6	25,4	6,3	3,0
	Terra Preta	lenhoso	44,5	31,6	35,4	1,5	0,7
	Terra Preta	reprodutivo	45,5	23,7	34,1	0,5	0,2
	Solo transição	folha	45,9	23,3	23,3	6,2	2,8
	Solo transição	lenhoso	44,6	21,5	33,5	0,9	0,4
	Solo transição	reprodutivo	44,6	32,1	38,3	0,5	0,2
	Solo adjacente	folha	47,5	30,4	28,2	7,4	3,5
	Solo adjacente	lenhoso	46,5	35,5	35,8	1,7	0,8
	Solo adjacente	reprodutivo	48,1	20,7	41,5	0,3	0,2
Lago Grande	Terra Preta	folha	45,5	41,7	23,6	9,5	4,3
	Terra Preta	lenhoso	47,4	20,3	34,3	2,1	1,0
	Terra Preta	reprodutivo	45,5	31,0	33,7	0,7	0,3
	Solo transição	folha	46,7	25,0	25,7	7,5	3,5
	Solo transição	lenhoso	45,7	46,6	35,6	1,5	0,7
	Solo transição	reprodutivo	48,4	27,0	38,6	0,4	0,2
	Solo adjacente	folha	47,7	28,1	22,2	7,3	3,5
	Solo adjacente	lenhoso	46,7	35,1	35,4	1,5	0,7
Autaz Mirim	Solo adjacente	reprodutivo	47,9	23,3	31,5	0,5	0,2
	Terra Preta	folha	47,6	30,7	24,5	6,4	3,1
	Terra Preta	lenhoso	47,3	42,2	34,4	1,4	0,7
	Terra Preta	reprodutivo	46,9	25,9	40,3	1,1	0,5
	Solo transição	folha	47,1	28,5	28,9	8,8	4,2
	Solo transição	lenhoso	46,6	38,2	38,8	1,1	0,5
	Solo transição	reprodutivo	45,2	25,8	46,9	0,9	0,4
	Solo adjacente	folha	48,6	28,9	27,4	7,1	3,4
Rio Urubú	Solo adjacente	lenhoso	47,8	38,9	37,8	1,0	0,5
	Solo adjacente	reprodutivo	47,8	33,4	42,4	1,0	0,5
	Terra Preta	folha	48,8	28,5	27,8	6,4	3,1
	Terra Preta	lenhoso	47,5	35,2	39,4	1,4	0,7
	Terra Preta	reprodutivo	47,8	20,6	47,1	0,6	0,3
	Solo transição	folha	49,0	29,0	26,6	6,6	3,2
	Solo transição	lenhoso	43,6	32,5	41,6	1,3	0,6
	Solo transição	reprodutivo	49,5	22,9	43,8	0,7	0,3
Rio Preto	Solo adjacente	folha	49,2	28,4	28,8	6,2	3,1
	Solo adjacente	lenhoso	47,2	40,3	43,1	1,7	0,8
	Solo adjacente	reprodutivo	48,0	23,4	43,4	0,4	0,2
	Terra Preta	folha	47,9	29,2	24,0	7,0	3,3
	Terra Preta	lenhoso	47,5	55,2	35,0	1,1	0,5
	Terra Preta	reprodutivo	48,4	26,2	53,8	0,3	0,1
	Solo transição	folha	49,4	32,1	25,9	6,2	3,1
	Solo transição	lenhoso	48,1	34,4	41,0	0,9	0,5
Rio Preto	Solo transição	reprodutivo	48,1	23,1	35,3	0,6	0,3
	Solo adjacente	folha	48,3	32,9	23,5	6,5	3,1
	Solo adjacente	lenhoso	47,7	50,2	37,6	1,0	0,5
	Solo adjacente	reprodutivo	49,4	29,8	45,0	0,5	0,3

Tabela A9. Valores médios do estoque de C e o fracionamento da MOS em cada local

Local	Tipo solo	Profundidade	estoque de C (Mg ha ⁻¹)	FLL	FLI	Areia (g C kg ⁻¹)	Argila+silte	Recuperação %
Encontro Águas	TPI	0-10	40,9	3,9	0,47	3,7	23,3	81
	TPI	10.20	27,5	2,1	0,12	1,4	18,7	88
	TPI	20-40	45,9	2,0	0,08	0,9	12,2	79
	ST	0-10	59,3	2,5	0,19	1,2	8,6	56
	ST	10.20	35,9	1,5	0,04	0,5	5,7	70
	ST	20-40	31,3	0,6	0,01	0,2	3,8	77
	SA	0-10	16,7	8,9	0,48	2,8	18,9	126
	SA	10.20	19,2	8,2	0,61	1,2	17,1	126
	SA	20-40	17,0	6,0	0,26	0,4	13,8	119
Lago Grande	TPI	0-10	13,8	4,3	0,36	1,6	26,5	64
	TPI	10.20	22,0	2,6	0,20	1,9	22,6	58
	TPI	20-40	20,2	2,4	0,09	1,1	19,0	83
	ST	0-10	36,7	3,6	0,29	1,0	10,3	58
	ST	10.20	30,3	2,7	0,17	0,7	10,9	95
	ST	20-40	21,6	1,5	0,04	0,4	8,4	93
	SA	0-10	48,6	1,3	0,07	0,4	9,5	57
	SA	10.20	54,7	1,0	0,08	0,4	7,8	63
	SA	20-40	67,8	0,6	0,11	0,3	6,7	65
Autaz Mirim	TPI	0-10	93,7	4,4	0,53	2,0	9,3	54
	TPI	10.20	48,4	3,1	0,36	1,3	10,7	69
	TPI	20-40	30,9	2,4	0,19	0,9	12,2	67
	ST	0-10	21,7	4,1	0,40	1,0	13,4	65
	ST	10.20	31,8	2,7	0,17	1,0	12,2	87
	ST	20-40	33,8	2,4	0,30	0,9	11,2	82
	SA	0-10	28,8	6,3	1,11	1,8	12,1	107
	SA	10.20	27,7	5,1	0,98	1,2	20,5	112
	SA	20-40	22,0	3,0	0,48	1,0	15,4	112
Rio Preto	TPI	0-10	34,8	3,3	1,04	0,9	9,3	55
	TPI	10.20	37,6	1,6	0,58	0,4	9,2	63
	TPI	20-40	27,7	1,4	0,50	0,5	8,4	55
	ST	0-10	37,1	8,2	0,61	0,6	12,2	92
	ST	10.20	30,4	1,8	0,34	0,5	12,7	108
	ST	20-40	66,0	1,8	0,18	0,8	9,7	74
	SA	0-10	41,8	4,3	0,17	0,6	8,8	86
	SA	10.20	24,7	2,7	0,43	0,8	8,7	98
	SA	20-40	39,1	1,0	0,21	0,4	6,0	87
Rio Urubú	TPI	0-10	25,4	4,5	0,44	3,6	9,0	46
	TPI	10.20	51,4	2,7	0,11	1,6	11,9	62
	TPI	20-40	51,5	3,1	0,30	0,9	13,1	55
	ST	0-10	21,2	4,7	0,30	2,6	9,9	54
	ST	10.20	13,5	4,7	0,19	1,8	17,2	54
	ST	20-40	24,8	2,9	0,10	1,2	13,8	75
	SA	0-10	37,8	10,8	0,57	1,2	19,1	128
	SA	10.20	40,4	6,6	0,19	1,1	16,7	100
	SA	20-40	27,6	4,5	0,07	0,7	12,2	114

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.