

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO**  
**CENTRO DE CIENCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOLOGIA**

**ADRIANA ROCHA DA PIEDADE**

**AS QUEIMADAS FREQUENTES E O CARBONO PRETO NA PERIFERIA LESTE  
DA AMAZÔNIA: QUANTIFICAÇÃO ANALÍTICA E ACUMULAÇÃO NO SOLO**

**São Luís - Maranhão**  
**Dezembro de 2012**

**ADRIANA ROCHA DA PIEDADE**

Engenheiro Agrônomo

**AS QUEIMADAS FREQUENTES E O CARBONO PRETO NA PERIFERIA LESTE  
DA AMAZÔNIA: QUANTIFICAÇÃO ANALÍTICA E ACUMULAÇÃO NO SOLO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do  
Programa de Pós-Graduação em Agroecologia da  
Universidade Estadual do Maranhão, para obtenção  
do título de Mestre em Agroecologia.

Orientador: Prof. Dr.Christoph Gerhing

**São Luís - Maranhão**

**Dezembro de 2012**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOLOGIA**

**Adriana Rocha da Piedade**

**AS QUEIMADAS FREQUENTES E O CARBONO PRETO NA PERIFERIA LESTE  
DA AMAZÔNIA: QUANTIFICAÇÃO ANALÍTICA E ACUMULAÇÃO NO SOLO**

Dissertação defendida em:     /    /    

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Christoph Gerhing (Orientador)**

---

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Guillaume Xavier Rousseau (UEMA)**

---

**Prof. Dr. Flávio Henrique Reis Moraes (CEUMA)**

## **DEDICO**

*Ao Senhor Deus, criador dos céus e da Terra, aos meus pais Guilherme da Piedade Neto e Maria Antônia Rocha da Piedade, e aos meus irmãos: Alesandra, Alexandra e Guilherme Julio Rocha da Piedade, que me oferecem um amor e apoio verdadeiro e incondicional em todos os dias de minha vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por me conceder a cada novo dia: força, esperança e fé e, por sempre está presente em meu coração em todos os momentos de minha vida.

À Universidade Estadual do Maranhão, através do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, aos seus professores, coordenadores e funcionários, pelas oportunidades, pelos ensinamentos e pelo apoio técnico-científico.

À CNPQ, pela concessão de bolsa de estudos.

Ao meu orientador Christoph Gerhing.

Ao meu co-orientador Prof.Dr. Guillaume Xavier Rousseau, pelo exemplo de dedicação à ciência, pelos ensinamentos precisos que ficarão para sempre e pela harmoniosa convivência em todas as etapas da realização deste trabalho, que representaram a persistência e orientação necessárias para a conclusão de mais essa vitória, sendo fonte de calma e conhecimento.

Aos colegas da Pós-Graduação em Agroecologia, especialmente a Marcio, Henry e Ernesto, pelas ricas discussões e pelo companheirismo.

Aos técnicos João e Josael do Núcleo Tecnológico de Engenharia Rural, por permitir a realização das análises e pela disposição e ajuda.

A Elenilson Kleber Viegas Barros por se fazer presente em minha vida e me dá apoio nos momentos difíceis.

Aos meus estagiários que me auxiliaram: Alesandra, Dailiene, Livia Maria, Luís Augusto, Liliane e Victoria, e, em especial a Alexandra e Alesandra, que sempre estiveram dispostos a ajudar e a todos pelos momentos de descontração.

**Muito obrigada!**

**“Sobre tudo o que se deve guardar, guarda bem o teu coração. Porque dele procedem as decisões da vida.” (Provérbios 4:23).**

**“Não deixe a vida desanima-lo, todos que chegaram, tiveram que começar de onde estavam.”**

**Richard Louis Evans**

## SUMÁRIO

	Página
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	viii
<b>RESUMO</b> .....	xix
<b>ABSTRACT</b> .....	xx
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	13
<b>2.1 Uso da Terra no leste da Amazônia Oriental</b> .....	13
<b>2.2 Carbonização</b> .....	13
2.2.1 Eficiência de queima e fatores determinantes .....	17
2.2.2 Carvão vegetal .....	18
<b>2.3 Carbono preto</b> .....	19
<b>2.4 Transporte e acumulação de carbono preto e a textura do solo</b> .....	20
<b>2.5 Métodos de quantificação de carbono preto</b> .....	23
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	27
<b>ARTIGO</b> .....	46
<b>RESUMO</b> .....	47
<b>ABSTRACT</b> .....	48
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	49
<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	52
<b>Áreas de estudo</b> .....	52
<b>Amostragem, preparo das amostras e análises de solo</b> .....	52
<b>Análises estatísticas</b> .....	54
<b>RESULTADOS</b> .....	54
<b>Efeito da vegetação sobre a concentração de carbono preto</b> .....	54
<b>Concentrações de carbono preto nos diferentes núcleos agrupados</b> .....	55
<b>Carbono preto e textura do solo</b> .....	55
<b>Carbono preto e densidade do solo</b> .....	56
<b>DISCUSSÃO</b> .....	56
<b>CONCLUSÕES</b> .....	58
<b>BIBLIOGRAFIA CITADA</b> .....	60

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Núcleos de estudo.....	66
<b>Figura 2.</b>	Efeito da vegetação e uso prévio na concentração de carbono preto na primeira camada do solo (0-5 cm) amostrada ao nível de 5% de probabilidade .....	66
<b>Figura 3.</b>	Concentrações de carbono preto entre os núcleos agrupados e nas diferentes profundidades dos solos amostrados. Para cada profundidade, médias dos núcleos seguidas pelas mesmas letras maiúsculas não diferem entre si. Para cada núcleo, médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem significativamente entre as profundidades, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.....	67
<b>Figura 4.</b>	Relação entre concentração de carbono preto e teor de argila na profundidade entre 50-60 cm no solo.....	67
<b>Figura 5.</b>	Carbono preto e densidade aparente do solo em diferentes profundidades. Em 5A, observa-se a relação a profundidade entre 5-10 cm, em 5B a relação na profundidade entre 20-30 cm e em 5C a relação na profundidade entre 90-100 cm.....	68



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b>	Quantidades e porcentagens de carvão na biomassa total de 14 capoeiras com diferentes idades e sistemas de uso da terra na Amazônia brasileira .....	15
<b>Tabela 2.</b>	Concentrações de C-preto a partir de material carbonizado produzido da biomassa de diferentes eventos de uso do fogo na Amazônia brasileira prescritas na literatura em diversos sistemas agrícolas .....	16
<b>Tabela 3.</b>	Resumo de métodos usados para a quantificação de Carbono preto.....	24
<b>Tabela 4.</b>	Teores de carbono preto em diferentes solos mundiais .....	64
<b>Tabela 5.</b>	Áreas de capoeiras, florestas e pastos estudados .....	65

## AS QUEIMADAS FREQUENTES E O CARBONO PRETO NA PERIFERIA LESTE DA AMAZÔNIA: QUANTIFICAÇÃO ANALÍTICA E ACUMULAÇÃO NO SOLO

Autor: Adriana Rocha da Piedade

Orientador: Prof. Dr. Christoph Gehring

### RESUMO

A escolha de um método eficaz com características de baixo custo e de fácil aplicação para a maioria dos laboratórios, principalmente em áreas com diferentes históricos de uso, intensidade e frequência do fogo, como os solos tropicais, é de grande interesse. É difícil comparar as estimativas existentes sobre as quantidades de carbono preto devido este ser obtido por diferentes métodos. O objetivo deste estudo foi verificar a utilidade do método descrito por Kurth *et al.* (2006), para a estimativa da concentração de carbono preto em perfis do solo entre 0 a 1 metro de profundidade em ecossistemas contrastantes na Amazônia Oriental com diferentes históricos de uso e frequência de fogo. O experimento foi realizado em áreas compreendendo quatro capoeiras baixas (4-7 anos), quatro capoeiras médias (11-15 anos), duas capoeiras altas (20-40 anos), cinco florestas primária e um pasto, concentrados em 4 ‘núcleos’ no norte do Maranhão e sul do Pará. O uso do fogo possui efeito significativo apenas na primeira camada dos solos amostrados. Os núcleos apresentam variação textural com o aumento da profundidade, o que implica na variação da densidade aparente do solo. Os maiores valores de densidade do solo favorecem a incorporação parcial do carbono preto na fração do complexo organo-mineral com proteção realizada pela argila. O teor de argila e a densidade podem contribuir para que o método Kurth et al (2006) tenha sua eficiência reduzida, com maior precisão para solos com maiores concentrações de carbono preto (>2%) e sem variação textural no perfil amostrado.

**Palavras – chave:** analítica, solo tropical, fogo.

# AS QUEIMADAS FREQUENTES E O CARBONO PRETO NA PERIFERIA LESTE DA AMAZÔNIA: QUANTIFICAÇÃO ANALÍTICA E ACUMULAÇÃO NO SOLO

Author: Adriana Rocha da Piedade

Advisor: Prof. Dr. Christoph Gehring

## ABSTRACT

Choosing an effective method with features of low cost and easily applicable for most laboratories, particularly in areas with different histories of use, frequency and intensity of the fire, as tropical soils, is of major interest. It is difficult to compare existing estimates of the quantities of carbon black due to this being obtained by different methods. The aim of this study was to assess the usefulness of the method described by Kurth et al. (2006), to estimate the concentration of black carbon in soil profiles from 0 to 1 meter deep in contrasting ecosystems in the eastern Amazon with different historical usage and frequency of fire. The experiment was conducted in areas cleared tracts comprising four (4-7 years), four barns medium (11-15 years), two barns high (20-40 years), five primary forest and pasture, concentrates on 4 'cores' in northern Maranhao and southern Para. The use of fire has a significant effect only in the first layer of soil sampled. The cores show textural variation with increasing depth, which implies variation of the bulk density of the soil. The highest density of soil favor the partial incorporation of carbon black in the fraction of organo-mineral complex with protection held by clay. Clay content and density can contribute to the method Kurth et al (2006) has reduced its efficiency, with greater accuracy for soils with higher concentrations of black carbon (> 2%) and no change in textural sampled profile.

**Keywords:** analytical, tropical soil, fire.

## 1 INTRODUÇÃO

Os ecossistemas terrestres, que compreendem a vegetação e o solo, são considerados como um grande sumidouro de carbono (HOUGHTON, 2001). O solo em média, possui 4,5 vezes mais carbono do que o encontrado na biota, e 3,3 vezes mais do que a atmosfera (LAL, 2004), com cerca de 75% do total de carbono terrestre armazenado (DIXON et al. 1994; MERINO, 2008).

O fogo na Amazônia brasileira inclui a queimada da floresta nas áreas que estão sendo desmatadas para agricultura e pecuária, incêndios florestais e queimada de diferentes tipos de capoeiras (FEARNSIDE, 2002), o que origina grandes quantidades de carvão vegetal.

A estabilidade biológica do carvão em solos e sedimentos bem como sua contribuição para a distribuição e conteúdo de carbono no solo permanece ainda desconhecidas (SKJEMSTAD et al. 1996), o que torna difícil um método que abranja todos os compostos do contínuo de combustão sem superestimar ou subestimar algum desses componentes, entre eles o carbono preto (C-preto).

Hammes et al. (2007) comparam os diferentes métodos de extração e análise de C-preto e relatam diferenças muito grande e não sistemáticas entre estes métodos, deste modo impossibilita um consenso científico sobre o ‘método certo’ ou a comparabilidade dos resultados gerados, com várias dimensões de discrepância, e sem consenso sobre o método adequado para sua determinação (SIMPSON; HATCHER, 2004; HAMMES et al. 2007).

Em outro contexto, surge a necessidade de se ter conhecimento sobre os efeitos quantitativos das queimadas na acumulação do C-preto em capoeiras de diferentes idades e da escolha de um método padrão confiável que sirva de atualização dos inventários nacionais das remoções por sumidouros de carbono (WOLFF; KLIMISCH, 2006), e como estratégia para o manejo adequado da terra e a diminuição do desmatamento na Amazônia Oriental.

Kurth et al. (2006) relatam o sucesso do método de digestão com uso de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e ácido nítrico ( $HNO_3$ ) para quantificar os teores de C-preto em solos de clima temperado, com características de eficácia, de baixo custo, de fácil manuseio, disponibilidade e repetibilidade de sua versão.

Com esta fundamentação, espera-se com este estudo, que haja uma maior compreensão através da verificação da utilidade da digestão por peróxido de hidrogênio e

ácido nítrico fraco através da versão adaptada do método descrito por Kurth et al. (2006) adaptado, para a estimativa da concentração de carbono preto em solos no norte do Maranhão e sul do Pará na Amazônia Oriental com diferentes históricos de uso e frequência de fogo: floresta primária, capoeira de floresta primária, capoeira de pasto e sistema de corte e queima e com diferença textural.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Uso da Terra no leste da Amazônia Oriental**

Os solos possuem os maiores estoques de carbono armazenado em áreas tropicais, com 36-60% de C em ecossistemas florestais (DIXON et al. 1994; MALHI et al. 1999; ROBERT, 2001; FAO, 2006), sendo maiores do que qualquer outro tipo de uso da terra em profundidade de até 1 m em equilíbrio estável (ROBERT, 2001). Os autores Wooster et al. (1998) e Robert (2001), citam a floresta primária na Amazônia, com cerca de 305 t / ha C, dos quais 28 % é abaixo do solo.

Devido ao uso da terra na Amazônia (HOUGHTON, 1999; ACHARD et al. 2004), através da conversão da floresta em sistemas agrícolas (FAO, 2006), com a combinação da agricultura e da pecuária (FREITAS, 2008), ocorre perdas adicionais a partir do C remanescente (ROBERT, 2001).

As áreas de agricultura e pecuária são resultantes de áreas de crescimento espontâneo de vegetação secundária após pousio ou abandonadas após degradação da floresta primária (PEREIRA; VIEIRA, 2001; KATO et al. 2006), que originaram um mosaico de capoeiras com caráter heterogêneo, com diferentes idades (LIMA et al. 2007), o que induz transformações importantes na dinâmica do carbono, com menores estoques do que no solo original da floresta (ROBERT, 2001).

O pousio na agricultura de corte e queima restaura parte do carbono do solo (PONCE-HERNANDEZ, 1999; ROBERT, 2001), e no pasto reestabelecido, a perda é muito menor e certa quantidade de C é recuperado ao longo de alguns anos após o abandono (De MORAES et al. 1996; ROBERT, 2001), devido a vegetação secundária por meio da rebrota de tocos, raízes e sementes que resistiram às perturbações da floresta primária (KATO et al. 2006).

Segundo Noordwijk et al. (1997), em regiões tropicais, os teores de carbono do solo (CS) variam em função do uso da terra, com uma tendência de decréscimo no sentido: floresta

primária - capoeira secundária - áreas de culturas com espécies de ciclo longo - áreas de agricultura itinerante (“*slash and burn*”), e com algumas condições existentes nas áreas agrícolas que favorecem as perdas de carbono do solo, como a elevação do pH. Em geral, o conteúdo de C no solo sob pastagem é maior do que com culturas agrícolas (ROBERT, 2001).

## 2.2 Carbonização

A carbonização é a destilação da madeira que a transforma em carvão vegetal e fração composta por vapores e gases (alcatrão, pirolenhosos e gases não-condensáveis) (SAMPAIO; MELLO, 2001; COLOMBO et al. 2006).

As transformações sofridas pelos principais componentes da madeira: a celulose, as hemiceluloses e a lignina originam um gradiente entre material vegetal superficialmente carbonizado e material altamente condensado e recalcitrante através da combustão incompleta (LEWIN; GOLDSTEIN, 1991; TSOUMIS, 1991; JUNIOR, 1999), com o aumento da concentração de carbono preto na ausência de oxigênio livre (ALMEIDA; REZENDE, 1982; KUHNBUSCH; CRUTZEN, 1995; FILHO, 2005).

Na combustão incompleta, ocorre a distinção entre as partículas de C-preto resultante das diferenças em suas propriedades químicas e físicas, tais como, o tamanho da partícula, temperatura de formação, morfologia, grau de aromaticidade, área superficial, densidade, proporção molar carbono/hidrogênio (C/H) e razão molar carbono/oxigênio (C/O) (EGLINTON; REPETA, 2003; ELMQUIST et al. 2004; PRESTON; SCHMIDT, 2006; LEIFELD, 2007; HAN et al. 2009).

A característica comum que define a biomassa alterada pela queima (*char-BC*) é a presença de estruturas de anéis aromáticos fundidos, que permanece após a combustão incompleta de material vegetal, composta de partículas, que variam entre 1-100 nm, sendo formado em baixas temperaturas, o que significa que o seu precursor não é completamente destruído e algumas características morfológicas podem persistir mesmo depois da queima, que dependem do material precursor, da temperatura de combustão e o tempo de duração da combustão (KUHNBUSCH et al. 1996; BALDOCK; SMERNIK, 2002; CZIMCZIK et al. 2002; NGUYEN et al. 2004; ELMQUIST, 2007; HAN et al. 2009).

Segundo Seiler e Crutzen (1980), a queima da biomassa leva a uma significativa produção de materiais vegetais carbonizados, carvão vegetal, que resulta em considerável aumento na aromaticidade do material remanescente, em detrimento de grupos carboxílicos e estruturas alifáticas.

Desta forma, contribui para que o C-preto represente um significativo reservatório de carbono, já que a queima da vegetação e a combustão do carvão transferem carbono para o solo em longo prazo (MIDDELBURG et al. 1999; MASIELLO, 2004), através de partículas finas de C-preto, que se mistura ao solo (CZIMCZIK et al. 2003), principalmente, pela mudança de uso da terra (KUHNBUSCH; CRUTZEN, 1995).

O aumento no conteúdo de carbono preto, derivado do carvão, foi identificado por Skjemstad et al. (2001) em análise de RMN <sup>13</sup>C, com uma única forma de carbono que sobrevive ao processo de decomposição por longos períodos de tempo com a formação de compostos de carbono com altos níveis de recalcitrância (FEARNSIDE, 2000; LEHMANN et al. 2006; RUMPEL et al. 2006a; KNICKER, 2007).

A taxa de produção de C-preto é dominada pela vegetação queimada (FORBES et al. 2006; PRESTON; SCHMIDT, 2006). Com base em taxas de conversão, Kuhlbusch e Crutzen (1995) estimam que mais de 80% de C-preto produzido por incêndios permanece nos resíduos e menos de 20% é liberado com a fumaça, sendo o desmatamento da floresta primária e a agricultura itinerante, os maiores responsáveis no ciclo global de C-preto, com contribuição em cerca de 50% para a formação de C-preto anualmente e de suas perdas.

O que contradiz os resultados de Wandelli (2008), ao afirmar que não há diferença significativa entre o uso do fogo e a quantidade de carvão produzido, sem diminuição da quantidade de carvão depositado sobre o solo com o aumento da idade da capoeira.

Outras considerações feitas pelo autor acima citado se referem ao fato de não existir diferença entre a quantidade de carvão sobre o solo de capoeiras cujas madeiras foram extraídas para produção de carvão e as que não foram, e ainda, entre o número de vezes que a área de capoeira foi submetida a queimadas, porém, a conversão da floresta primária pelo uso do fogo pela primeira vez ocasiona acréscimos de carvão vegetal, com decréscimo na pastagem seguido pela agricultura de corte e queima resultante da quantidade de biomassa original a ser queimada (tabela 1).

**Tabela 1.** Quantidades e porcentagens de carvão na biomassa total de 14 capoeiras com diferentes idades e sistemas de uso da terra na Amazônia brasileira.

I dade (anos)	Estimativa de Biomassa Original Total (kg/ha)	Sistema de Uso da Terra	Quantidade de Carvão produzido (aérea + troncos mortos da floresta + carvão) (kg/ha)
1	10,85–10,88	Agricultura	0,80–2,02
2	13,35–34,33	Agricultura	1,22–1,50
3	14,95	Agricultura	0,27
4	27,14	Agricultura	0,39
6	21,97–37,38	Agricultura	0,79–2,45
1	5,68–7,19	Pastagem	1,78–1,10
2	11,83	Pastagem	0,53
7	37,56	Pastagem	0,61
8	17,27–28,90	Pastagem	0,18–1,96
0	21,62–39,30	Pastagem	0,27–0,31
1	28,57	Pastagem	0,61
2	30,59–38,85	Pastagem	0,55–2,42
3	35,04	Pastagem	0,96
00	100	Floresta	34,4

**Fonte:** Adaptado de Wandelli (2008).

Segundo Fearnside et al. (2001), a conversão da biomassa em estoques de carbono, de acordo com a classificação por tamanho das frações acima do solo antes e depois da queima, possui os maiores estoques em  $\varnothing > 10$  cm na pré-queima (133% C) e na pós-queima nos diâmetros  $\varnothing > 10$  cm (111,1% C e 61,2 % C no Ctotal), em  $\varnothing 5$ cm (14,8% C) na pré-queima e (3,0% C e 1,7% C no Ctotal) na pós-queima, em  $\varnothing 5-10$  cm (11,9% C) na pré-queima e (5,0% C e 3,2% C no Ctotal) na pós-queima e no carvão (3,2% C e 1,8% C no Ctotal) na pós-queima como decorrente das quantidades de biomassa original na Amazônia brasileira.

Na tabela 2, podem ser observadas as concentrações de C-preto a partir de material carbonizado da biomassa na Amazônia brasileira em diversos sistemas agrícolas. Na qual as menores concentrações de C-preto no C consumido pelo fogo é resultante de pastagem com menor eficiência de queima. Para as áreas em que o uso da terra é de agricultura de corte e queima ocorre as maiores concentrações de C-preto no C consumido pelo fogo com maior eficiência de queima.



Fearnside (2000) estima que, de  $3,1 \times 10^6$  t da biomassa da floresta tropical com C exposto a chamas,  $1,1 \times 10^9$  t é emitida para a atmosfera e apenas  $49 \times 10^6$  t em forma de carvão vegetal, com  $26-31 \times 10^6$  t de C-preto altamente recalcitrante. Resultados similares foram encontrados por Lehmann et al. (2006), estimando que apenas cerca de 3% do C da biomassa é convertida após queima em C-preto.

**Tabela 2.** Concentrações de C-preto a partir de material carbonizado produzido da biomassa de diferentes eventos de uso do fogo na Amazônia brasileira prescritas na literatura em diversos sistemas agrícolas.

Sistema de uso da terra	Q (%)	Combustível	Método	Tipo de resíduo no solo	C-p (%)	C (%)	C no Ccons. (%)	C	Rendimento de Cp no Ctotal (t/ha <sup>1</sup> )	Autor
Agricultura	1,3	Troncos, galhos, folhas e detritos	Gravimétrico e volumétrico (LIS)	Carvão vegetal	,7	4,9	,3	7	3,50	Fearnside et al. (1993)
Agricultura	1,3	Galhos, troncos	Gravimétrico e volumétrico (LIS)	Carvão vegetal	,7	4,8	,88	2	2,50	Arbosa e Fearnside (1996)
Agricultura	1,3	6 classes de floresta derrubada	Gravimétrico e volumétrico (LIS)	Carvão vegetal	,3	2,0	,95	2	2,20	Fearnside et al. (1999)
Agricultura	1,3	11 classes de floresta derrubada	Gravimétrico e volumétrico (LIS)	Carvão vegetal	,9	8,0	,81	7	6,4 (2,7)	Ráça et al. (1999)
Agricultura	1,3	10 classes de floresta derrubada	Gravimétrico e volumétrico (LIS)	Carvão vegetal	,9	8,3	,86	5	4,3 (5,9)	Fearnside et al. (2001)
Agricultura	1,3	Madeiras, raiz fina e combustíveis	Gravimétrico e volumétrico (LIS)	cinza	,1	0,3	,33	2	8,8 (6,6)	Kauffman et al. (1995)
Agricultura	1,3	Madeiras, raiz fina e combustíveis	Gravimétrico e volumétrico (LIS)	cinza	,1	1,2	,11	2	10,9 (1)	Kauffman et al. (1995)
Agricultura	1,3	Madeiras, raiz fina e combustíveis	Gravimétrico e volumétrico (LIS)	cinza	,8	2,0	,35	5	9,4 (1,4)	Kauffman et al. (1995)
Agricultura	1,3	Madeiras, raiz fina e combustíveis	Gravimétrico e volumétrico (LIS)	cinza	,3	5,8	,45	1	7,2 (1,3)	Kauffman et al. (1995)
Pastagem	5,6	Pasto de 2-3 anos acima da superfície	Gravimétrico	cinza	,07	2,1	,35	0	0,25 (0,19)	Arbosa e Fearnside (1996)
Pastagem	5,6	Pasto de 2-3 cm acima da superfície	Gravimétrico	cinza	,5	1,2	,66	3	2,05 (0,17)	Kauffman et al. (1998)

EQ = Eficiência de queima (%); ECp = Estimativa de C-preto (%); CC = Carbono consumido pelo fogo (%); C-p no Ccons = Carbono preto no carbono consumido (%)

**Fonte:** Adaptado de Forbes et al. (2006) e Wandelli (2008).

Em solos tropicais, as perdas de carbono observadas após a retirada da vegetação natural e cultivo dos solos são mais elevadas, com situações em que os estoques de carbono são reduzidos em mais de 50%, em menos de 10 anos de cultivo através do uso contínuo do solo (SHANG; TIESSEN, 1997). Entretanto, em um cenário de três queimadas ao longo de um período de 10 anos elevaria a porcentagem de C acima do solo que é convertida em carvão de 2,2% para 2,9% (FEARNSIDE, 2002).

O C-preto é uma fração do carbono orgânico total acima do solo (SKJEMSTAD et al. 1996; KANG, 2002), com cerca de 10%. Esta gama é baixa em comparação com a produção em grande taxa de C-preto de queima de biomassa natural (CZIMCZIK et al. 2003), responsável pelas fontes primárias de C-preto nos sedimentos do solo (GRIFFEN; GOLDBERG, 1983; GOLDBERG, 1985; HERRING, 1985; KANG, 2002), com estimativas de produção no intervalo entre 0,05-0,27 Gt C/ano (KUHLBUSCH; CRUTZEN, 1995; DRUFFEL, 2004).

Ao utilizar as taxas de produção de C-preto proposto por Seiler e Crutzen (1980), Crutzen e Andreae (1990) e Kuhlbusch e Crutzen (1995, 1996), juntamente com a resistência à degradação, Schmidt e Noack (2000), concluiu que o C-preto representa uma proporção significativa de todas as frações do carbono orgânico enterrado nos solos e sedimentos.

### 2.2.1 Eficiência de queima e fatores determinantes

A eficiência de queima é a porcentagem do carbono pré-queima acima do solo a ser emitida como gases (FEARNSIDE, 2002). Na manutenção da queima os materiais de tamanho menor que queimam mais rapidamente sustentam a carbonização dos troncos e galhos maiores (OTTMAR, 1983; CARVALHO, 1999; NIENHUYS, 2005), com a liberação de materiais voláteis e maior superfície de contato (JENKINS et al. 1998).

A queima eficiente varia com o número de queimadas e tipo de vegetação. A eficiência de queima segue a seguinte sequência: é maior nas áreas de agricultura de corte e queima (91,3%) (WANDELLI, 2008), alta na queima de capoeiras baixas (45,6%) (MACKENSEN et al. 1996; WANDELLI, 2008), e baixa na primeira queimada da mata primária (9,6%) (KAUFMANN et al. 1998; FEARNSIDE et al. 2001; WANDELLI, 2008), devido, as queimadas seguintes não desestabilizarem o carvão já presente no solo (SCHMIDT et al. 1999, ANSLEY et al. 2006).

A queima eficiente influencia a taxa de produção de C-preto, no qual, uma eficiência de queima de 90%, converte o carbono exposto ao fogo em um máximo de produção de C-preto (KUHNBUSCH; CRUTZEN, 1995). Entretanto, a frequência do fogo e a quantidade e natureza do combustível determinam o carvão produzido. Em queimadas frequentes, ocorre os decréscimos na concentração de C-preto embora em áreas de agricultura a eficiência seja elevada. Em incêndios florestais embora apresentem baixa eficiência de queima, produzem mais carvão do que em savana ou pastagens, pois, resulta de apenas uma ou três queimadas (STOCKS; KAUFFMAN, 1997; FEARNSTIDE, 2002).

A queima eficiente depende da intensidade da queima, da temperatura final, da exposição do material ao fogo, da duração do fogo, da taxa de oxigênio (GONZÁLES-PÉREZ et al. 2004; LEI et al. 2009). A temperatura da carbonização afeta as propriedades agronômicas do carbono preto (CP). Em temperaturas (p. ex., <350°C) há produção de maior quantidade de material carbonizado, porém com menor grau de aromaticidade do que em queimadas mais intensas, que aumentam o teor de cinzas (KNICKER et al. 2006; 2007; HOSSAIN et al. 2011).

A continuidade da eficiência da queima depende de combinações de fatores físicos e químicos do material, da elevada relação área/volume, o que fornece sítios para o ataque do oxigênio (O<sub>2</sub>) (OHLERMILLER, 1985; PURI, 1993; CARVALHO, 1999), e somente ocorre se o combustível for poroso, para a propagação do calor gerado pela reação de oxidação do combustível, com transporte de oxigênio através dos poros (ALMEIDA; REZENDE, 1982).

A redução da eficiência de queima ocorre no excesso de O<sub>2</sub>, o que propicia a redução da combustão (BEJAN, 1997; Van WYLEN, 1998), já em ausência parcial ou total O<sub>2</sub> e aumento da temperatura (< 400°) ocorre à formação de produtos da oxidação parcial, com alta taxa de material carbonizado e formação de C-preto por combustão incompleta. Em temperaturas entre 400-600°C, ocorre decréscimo de C-preto produzido (MARTIN, 2007; WRIGHT et al. 2008).

### 2.2.2 Carvão vegetal

O carvão é um material sólido, poroso, de fácil combustão (BRASIL, 2000), constituído de materiais de coloração preta e altamente aromáticos ou com estrutura grafítica (SMERNIK et al. 2000). Sua constituição química ocorre em frações distintas de materiais

voláteis, cinzas, carbono fixo e fuligem (OLIVEIRA, 2003), com uma fração considerada resistente à decomposição biológica e alteração química (HAMMES et al. 2007), com característica de recalcitrância (relação C/N) e a presença de grupos funcionais em sua conformação (SOLLINS et al. 1996).

O carvão vegetal depende da eficiência da queima, sendo uma maneira pelo qual o carbono pode ser transferido para um estoque de longo prazo no solo (FEARNSIDE, 2002), cujas suas distintas frações determinam o destino, o transporte e especificidade do C-preto no solo (BROWN, 2009).

As matérias voláteis são substâncias com influência na estrutura do carvão, devido a sua porosidade, diâmetro médio dos poros, densidade e outras características físicas do carvão que podem ser alteradas drasticamente pela eliminação dos voláteis (OLIVEIRA, 2003).

A cinza é um resíduo de sais inorgânicos, que correspondem aos minerais dos vegetais, com variação entre e dentro das espécies, constituídos de carbonatos, fosfatos, silicatos e sulfatos de cálcio, de magnésio ou de potássio (IPT, 1988; FENGEL; WEGENER, 1989; DUEÑAS, 1997; ANDRADE, 2006).

A fuligem é formada na ausência de oxigênio (região primária) e pode ser consumida na região secundária (com maior concentração de O<sub>2</sub>) se a temperatura for suficientemente elevada (LEFEVRE, 1983; CARVALHO; LACAVA, 2003), com a formação de uma variedade de compostos, como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH) e materiais altamente grafitizados (SCHMIDT; NOACK, 2000),

### **2.3 Carbono preto**

O carbono preto (C-preto) é resultado de um contínuo de espécies, altamente condensado (ELMQUIST, 2004; 2007), do carbono residual (C-residual) resistente a oxidação e a decomposição química e biológica em virtude de sua formação e transformação pelo fogo (KNICKER et al. 2007), como produtos da queima incompleta da biomassa (HAMMES et al. 2007).

É o mais inerte componente da MO (SMERNIK et al. 2000), com granulidade fina e elevado teor de carbono orgânico (CO) (LEHMANN; JOSEPH, 2009). São morfologicamente constituídos por um empilhamento em camadas de unidades estruturais poliaromáticas e

grafíticas, que exibem grandes diferenças em extensão e nível de organização, com grandes quantidades de cadeias alifáticas além de um considerável conteúdo de O<sub>2</sub> (POIRIER et al. 2002), com alta porosidade e apresenta grande área de superfície específica, cuja oxidação lenta no solo produz grupos funcionais negativos na sua superfície (NÓBREGA, 2011).

A recalcitrância do C-preto é explicada através de sua composição quimicamente heterogênea, com elevado conteúdo de carbono e estruturas altamente aromáticas com poucos grupos funcionais reativos (GÉLINAS et al. 2001), com partículas constituídas por uma estrutura tridimensional, composta de lâminas aromáticas planares e sobrepostas, nas quais o aumento da aromaticidade é diretamente proporcional a resistência a elevação térmica, química e biológica (SKJEMSTAD et al. 1996; MASIELLO, 2004; KOELMANS et al. 2006; FORBES et al. 2006), o que contribui para a sua permanência no solo por longo período de tempo que excedem a centenas de anos (MIDDELBURG et al. 1999; GÉLINAS et al. 2001; FORBES et al. 2006; PRESTON; SCHMIDT, 2006).

#### **2.4 Transporte e acumulação de carbono preto no solo**

De acordo com estimativas encontradas na literatura, concentrações superiores a 80% de C-preto produzido se depositam no solo com característica de recalcitrância, tornando-se fração mais antiga (FORBES et al. 2006; PRESTON; SCHMIDT, 2006), que ocorre a partir da sua estrutura aromática e proteção física devido à sua funcionalidade e ligação com complexos organo-minerais (PESSENDA et al. 2001; BRODOWSKI et al. 2005; FORBES et al. 2006; RUMPEL et al. 2006b, 2008).

No entanto, em vez de ser completamente inerte, é mais provável que o grau de resistência do C-preto à ruptura seja dependente da extensão de variação dos componentes orgânicos do resíduo alterados pós-fogo pelos processos térmicos (BALDOCK; SMERNIK, 2002).

Os autores Czimczik e Masiello (2007) propuseram que um solo rico em C-preto é resultado de diversos fatores em conjunto. Dentre estes, temos o uso eficiente do fogo, seguido de um precursor aromático e de condições adequadas, como processos de adsorção e absorção para remover o C-preto da superfície e levá-lo para a subsuperfície e sua proteção em minerais contra a erosão, oxidação e degradação no solo o que contribui para a sua estabilidade.

Desta forma, a sorção no solo acaba por ser caracterizada como a combinação da absorção na matéria orgânica leve com a extensiva adsorção ao C-preto (CORNELISSEN et al. 2005; ENDO, 2009), com isso, a matéria orgânica (MO) dissolvida é capaz de atuar como um importante meio de transporte (HABERSTRO et al. 2006).

O C-preto em sedimentos agiria como um adsorvente ao interagir com moléculas orgânicas (KUBICKI et al. 1999). As partículas de C-preto quando não sofrem perturbações ficam retidas no sedimento (KRALOVEC et al. 2002), com a distância de seu deslocamento de acordo com o tamanho da sua partícula (MIDDELBURG et al. 1999; KIM et al. 2004; MASIELLO, 2004; KOELMANS et al. 2006). As partículas milimétricas de C-preto tende a se depositar próxima à sua fonte produtora, e as partículas maiores no local de origem (SCHMIDT; NOACK, 2000; MANNINO; HARVEY, 2004; MASIELLO, 2004).

Segundo Brodowski et al. (2006), a grande estabilidade do C-preto em solos não pode ser somente atribuída à sua estrutura refratária, mas também a acessibilidade quando fisicamente envolvido por argilas. É importante considerar que os solos altamente intemperizados, por exemplo, Latossolos e Argissolos, cobrem de 60 a 70% da área de terra tropical. Nestes solos as argilas de baixa atividade são predominantes e oferece minerais com menos superfícies para a proteção física e a estabilidade (FELLER et al. 1997; AXEL et al. 2010).

A distribuição das partículas do C-preto é influenciado pela natureza da biomassa e pelas condições da carbonização e por processos pedogenéticos e, assim, varia em função do tipo de solo (GLASER et al. 2000; 2001; SCHMIDT et al. 2002; LEI et al. 2009), no qual a maior parte produzido permanece no local de formação, sendo enterrado no solo com o passar de muitos anos, com variação entre 2 a 8% do CO, mas pode atingir 35% nas Terras Pretas de Índio (GLASER et al. 1998). As frações de solo com grãos mais finos possui uma superfície de adsorção mais elevada, tendem a apresentar uma maior afinidade que as frações de maior granulometria (MENICONI, 2007).

Os solos argilosos, beneficiam o C-preto (GLASER et al. 2002), com diferentes efeitos na decomposição em diferentes entradas (WANG et al. 2003). Boeni (2007) encontrou evidências de interação entre argilo-minerais e C-preto em Latossolos do Cerrado, no qual foi incorporado dentro dos microagregados, e assim, contribui para o tempo médio de residência do C-preto em solos.

Brodowski (2004), em seu estudo apresentou um significativo enriquecimento de C-preto dentro de agregados. Outras indicações para a agregação de C-preto e microagregados em argila foi encontrada em solos Chernozemicos (BRODOWSKI et al. 2005) e Antrossolos (GLASER et al. 2000) através de espectroscopia. Brodowski et al. (2006), em estudo em Luvisolo na Alemanha, em horizonte A, com histórico de uso entre floresta, pastagens e sob plantio, ao avaliar C-preto em agregados estáveis com marcadores específicos, obteve como resultado maiores concentrações em cerca de 7,2% no CO na fração de microagregados (<53µm), com concentrações menores nas frações de macroagregados (> 2 mm).

Masiello (2004) apontou que a produção e perda de C-preto nos processos não são equilibrados, no qual a perda é medida pela deposição em sedimentos, sendo removido mais rapidamente, durante a sua formação, para uma forma mais inativa com formação dos estoques de C-preto, com resistência à oxidação tal como a decomposição microbiana.

Ao considerar a taxa de produção estimada desde a formação do solo, os autores Kuhlbusch e Crutzen (1995), afirmam que o estoque de C-preto no solo é responsável por 25-125% de C (MASIELLO; DRUFFEL, 2003).

A decomposição do C-preto é significante em regimes de alternância de condições entre insaturação e saturação (NGUYEN et al. 2009), com a decomposição da MO em condições de saturação pelo processo de mineralização, o que ocasiona a destruição da estrutura do solo através da quebra de ligações entre os agregados com posterior disposição do C-preto a atividade microbiana (LEHMANN et al. 2009).

Em um Luvisolo, pertencente a um experimento de manejo de solo de longa duração no Canadá, a fração leve livre com C-preto apresentou uma taxa de degradação 2,5 vezes mais lenta do que a fração na ausência (MURAGE et al. 2007). Em Latossolo vermelho coletado sob pastagem no Cerrado, Roscoe e Burmann (2003) observaram quantidades razoáveis de partículas de C-preto nas frações leve oclusa e livre da MOS.

Na ocorrência de degradação abiótica ou biótica, apenas 45% de C, como por exemplo, em solo chenzênicos (BISCHOFBERGER, 2008). A decomposição fotoquímica e microbiológica são os dois mecanismos primários proposto para a degradação do C-preto, apesar da erosão, processos de bioturbação e a lixiviação que ocasionam a translocação de C-preto no perfil do solo também têm sido sugeridos como outras explicações possíveis de perda e acumulação (GOLDBERG, 1985; CZIMCZIK et al. 2003).

Para os fatores abióticos da decomposição do C-preto temos a oxidação por incêndios posteriores, que tendem a consumir o carvão já presente, e, conseqüentemente, o C-preto existente (SCHMIDT et al. 1999; ANSLEY et al. 2006; PRESTON; SCHMIDT, 2006).

Baldock e Smernik (2002) sugerem que a taxa de degradação do C-preto é determinado pela temperatura durante sua formação. Hamer et al. (2004) identificaram pelo menos uma pequena parcela do C-preto que é decomposto em curto prazo. Estes estudos fornecem evidência clara de que o C-preto e outros produtos da combustão incompleta sofrem algum grau de degradação.

Cheng et al. (2006) investigaram a importância relativa dos fatores bióticos e abióticos nos processos de oxidação de C-preto, em amostras incubadas térmicamente de 2 g com e sem inoculação microbiana, com adição ou não de esterco, e adição de nutrientes inorgânicos em 50 g de solo a partir de um horizonte de subsolo durante 4 meses, sob condições diferentes a 30 e 70° C. Concluíram que os processos abióticos desempenham um papel mais importante na oxidação de C-preto do que os processos bióticos.

Brodowski (2004), conforme apresentado por Preston e Schmidt (2006), em amostras incubadas com bactérias em carvão demonstraram uma rápida perda inicial de 5-50% do C-preto nos primeiros 6 meses e, em seguida, um decréscimo da degradação.

A decomposição do C-preto é reduzida nas camadas profundas (KIM et al. 2004), o que ocasiona sua distribuição em diferentes profundidades nos solos, com idade diferenciada e características de recalitrância, com alteração ao longo do tempo da sua capacidade de absorção e adsorção (SALDARRIAGA; WEST, 1986; GLASER et al. 2001; SCHMIDT et al. 2002; KRULL; SKJEMSTAD, 2002).

## **2.5 Métodos de quantificação de carbono preto**

Observa-se aparentes discrepâncias em todas as técnicas analíticas disponíveis para a estimativa do C-preto, com teores e concentrações que variam em mais de um fator de 500 para a mesma amostra analisada por meio de métodos diferentes (SCHMIDT et al. 2001).

As técnicas de medição de C-preto geralmente se classificam em seis classes. As técnicas microscópicas que medem o número de pedaços de carvão visíveis ao microscópio



óptico e fornecem informações úteis para a compreensão dos impactos dos aerossóis do C-preto no equilíbrio da atmosfera (MASIELLO, 2004).

Os métodos térmicos que analisam o C-preto remanescente após oxidação por aquecimento (CACHIER et al. 1989a, b; GUSTAFSSON et al. 1997). O método químico que estima o C-preto remanescente após a extração (GILLESPIE, 1990). O método por oxidação química para a remoção de frações de carbono não preto por UV e fotooxidação e análises elementares do solo (SKJEMSTAD et al. 1996; 1999; CZIMCZIK et al. 2003; SIMPSON; HATCHER, 2004).

As técnicas espectroscópicas identificam bandas de infravermelhos ou de regiões de RMN característicos dos produtos de combustão e estimam a concentração total de C-preto com base na intensidade das bandas, ou frequências após a remoção oxidativa do material orgânico definido como não C-preto (por exemplo, SMITH et al. 1975; SKJEMSTAD et al. 1999).

As técnicas de marcadores moleculares medem a concentração de um determinado composto ou classe de compostos associados e usa essa informação para extrapolar a concentração de C-preto (por exemplo, GLASER et al. 1998; ELIAS, 2001).

Adicionalmente, as técnicas já existentes, temos a medição advinda do uso em conjunto diferenciados das técnicas acima mencionadas (HUNTZICKER et al. 1982; KUHLEBUSCH, 1995). A tabela 3 apresenta o resumo de métodos comumente usados para a quantificação de carbono preto (CP) com as suas vantagens e desvantagens.

**Tabela 3.** Resumo de métodos usados para a quantificação de Carbono preto.

Métodos   Autores	Vantagens	Desvantagens
<b>Oxidação termoquímica</b>		
Remoção de não-CP por digestão pelo uso de HNO <sub>3</sub> e H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> . Seguida de tratamento térmico em placa aquecedora a 100° C durante 14 h. Após a oxidação o C restante da amostra que não oxidou é assumido como sendo a fração de C-preto, com posterior quantificação através da combustão seca por Autoanalyser – solo e material pirogênico. Kurth et al. (2006, adaptado); Jantalia et al. (2007); Bélanger e Pinno (2008).	Analicamente simples, evita a perda durante as etapas de manipulação no processo de preparação para a digestão. Possui baixo custo, fácil reprodutibilidade, etc.	Demora no tempo de digestão, e perda de material quando não observado durante as 3 h iniciais de efervescência. Baixa taxa de remoção de CO, que têm sido atribuída à sua incapacidade de oxidar compostos de CO mais recalcitrantes (MIKUTA et al. 2005).
A remoção de frações de não-CP por HCl, HNO <sub>3</sub> e NaOH é feito pelo pré-tratamento seguido por tratamento térmico prévio em oxigênio a 340 ° C durante 2 h. Kuhlbusch (1995).	O pré-tratamento químico minimiza a carbonização de frações de não-CP de solos com alto CO.	Oxidação possível do CP que depende da cinética; provável perda de grãos durante os passos de centrifugação/decantação de pequenas frações de CP.
Remoção de não-CP pelo pré-tratamento térmico ao ar a 375 ° C durante 24 h	Analicamente simples, evita a perda durante	Oxidação possível do CP que depende da cinética; possível criação de

seguida por pré-tratamento com HCl em situ. Análises elementares – sedimentos Gustafsson et al. (1997, 2001); Reddy et al. (2002).	as etapas de centrifugação e a manipulação.	C devido a carbonização com a transferência de massa não devidamente assegurado durante o pré-tratamento, o que ocasiona a possibilidade de sobreestimação.
Pré-tratamento ácido / base extenso seguido por tratamento térmico pré-tratamento de ar a 375 ° C durante 24h. Análises elementares. Gelinás et al. (2001).	Pré-tratamento químico implica na eliminação de frações de não C-preto.	Oxidação possível do CP que depende da cinética; possível perda de grãos pequenos de CP durante a química no pré-tratamento.
<b>Microscópico</b>		
Exame petrográfico de matéria orgânica – solo. Karapanagioti et al. (2000, 2001); Karapanagioti e Sabatini (2000a); Schmidt e Noack (2000).	Identificação precisa das distintas fases de CP através da identificação direta isolado e montado em uma lâmina de vidro e busca de evidências de vegetação queimada.	Pequenos grãos podem ser perdidos durante as etapas do pré-tratamento/ ou nas amostras incontáveis ao microscópio. Pode haver a contagem de vegetação carbonizada como Carvão.
Continua...		
durante o trata-mento térmico seguido por uso de He/O <sub>2</sub> , a fim de isolar o carbono orgânico, inorgânico e elementar Chow et al. (1993, 2001); Huntzicker et al. (1982); Turpin et al. (1990); Yu et al. (2002); Yu e Yang (2002).	Analticamente direto para frações de aerossol, com possível análise em pequenas alíquotas.	respeito a coleção usada para contabilizar a pirólise de compostos orgânicos de C durante a fase inicial de análise. Difícil aplicação para solos e sedimentos, com frações comparativamente mais elevados em partículas inorgânicas.
Moagem e balanço de massas por combustão – sedimentos. Fearnside et al. (1993).	Evita as perdas por manipulação das amostras.	Difícil distinção do C-preto dentro da heterogeneidade de resíduos calcinados. Os componentes minerais podem produzir erros de estimação.
Tratamento com o uso de Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ; H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 55 <sup>o</sup> C, 60 h, e calorimetria – sedimento. Lim e Cacchier (1996); Masielo et al. (2002).	O tratamento químico implica na eliminação da fração não C-preto	Difícil de aplicar em amostras ricas em C-preto e altamente hidrofílicas. A manipulação das amostras pode provocar perdas na determinação de C-preto.
Moagem e análises elementares, 30-100 <sup>o</sup> C, atmosfera oxidante – solos e sedimento. Lopez-Capel et al. (2005); De La Rosa et al. (2005).	Evita perdas por manipulação das amostras é rápido e possui boa reprodutibilidade.	Equipamento caro e sofisticado, necessita pré-tratamento das amostras completas para eliminar a fração mineral e evitar a sobre-estimação de C-preto.
<b>Oxidação química</b>		
Remoção de frações não- CP por UV e fotooxidação, quantificação de não-carbono aromático por lignina CPMAS-C <sup>13</sup> NRM, ClO <sub>2</sub> , HF e análises elementares - Solo. Skjemstad et al. (1996, 1999); Czimczik et al. (2003); Simpson e Hatcher (2004).	Evita a carbonização de frações não-CP de solos. Medida direta de componentes de carbono aromáticos.	Limitada precisão para assegurar a identificação e eliminação da fração de C- não preto. Tempo prolongado de análise e instrumentação cara.
Branqueamento do não-C por hipoclorito e quanti-ficação de carbono aromático residual por CPMAS-C <sup>13</sup> RMN. Chefetz et al. (2002).	Vantagens iguais a de cima.	Possível perda de fases diferentes durante o branqueamento e centrifugação/decaçãoção do CP, com capacidade de discriminação por hipoclorito; os passos não foram totalmente testado com carvões.
Eliminação do não-CP, através da extração de lipídeos, substâncias húmicas e fúlvicas e análise elementar de material resultante – solo, sedimento. Quénéa et al. (2005); De la Rosa et al. (2005).	Permite as análises das amostras naturais (solos e sedimentos) pobres em C-preto, e não requerem equipamento sofisticado.	Difícil aplicação em amostra rica em C-preto, pois, é altamente hidrofílica.
Oxidação química úmida com HCl, HF, NaOH, K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> e H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . Song et al. (2002).	Evita a carbonização de frações de não-CP.	A manipulação das amostras pode ocasionar perdas o que contribui para a não determinação do C-preto. Possível perda de fases durante a oxidação do CP por K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> e H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (SKJEMSTAD; TAYLOR, 1999).

Conversão de CP em ácidos benzenocarboxílico usando $\text{HNO}_3$ – solo e material pirogênico. Glaser et al. (1998).	Evita a carbonização de frações de não-CP; evita perdas durante os passos de centrifugação e manipulação.	Pressuposto questionável de que todos CP só é convertido em ácidos benzenocarboxílico. Problemas de sensibilidade com as amostras completas e o conteúdo de C-preto.
--	---	--

---

**Fonte:** Adaptado de Nguyen et al. (2004).

É evidente que cada uma destas técnicas mede uma região diferente dentro do contínuo de combustão. As técnicas microscópicas de contagem, por exemplo, detectam apenas relativamente grandes partículas de carvão, já o método térmico oxida as partículas de carvão menos refratários e medem apenas fuligem e grafite (GÉLINAS et al. 2001).

A falta de consenso sobre um método padrão resulta em estimativas de carbono que diferem entre si em várias dimensões (HAMMES et al. 2007), com a ocorrência de diversas fontes de erros, como: a transformação de compostos não derivados da combustão em pirogênicos, principalmente pelos métodos oxidativos e térmicos, inabilidade na detecção de C-preto e a detecção de material não pirogênico como se o fosse (MASIELLO, 2004).

Diante do exposto, torna-se necessária a estimativa de C-preto para compreender o balanço global nos ecossistemas, sobretudo no solo, sua acumulação em estoques e os fatores que podem interferir, como o número de queimadas e a influência do histórico de uso da terra, em diferentes níveis e escalas de tempo, durante os vários estágios de desenvolvimento da vegetação após a conversão para sistemas agrícolas. Como alternativa temos a digestão fraca pelo uso de peróxido de hidrogênio e ácido nítrico para a oxidação de C-preto (MIKUTA et al. 2005).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHARD, F; EVA, H. D.; MAYAUX, P.; STIBIG, H. J.; BELWARD, A. Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 18, 2004.

ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. **O processo de carbonização contínua da madeira**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, p. 143-156, 1982.

ANDRADE, A.S. Qualidade da madeira, celulose e papel em Pinus taeda I: influência da idade e classe de produtividade. 2006. 94 p. **Dissertação** (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, [2006].

ANSLEY, R. J.; BOUTTON, T. W.; SKJEMSTAD, J. O. Soil organic carbon and black carbon storage and dynamics under different fire regimes in temperate mixed-grass savanna. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 20, GB3006, 2006.

AXEL, D.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A. Impact of tropical land use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 17, n 4, doi : 10.1111/j.1365-2486.2010.02336, 2010.

BALDOCK, J. A.; SMERNIK, R. J. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. **Organic Geochemistry**, v. 33, n. 1, p. 93-109, 2002.

BARBOSA, R. I.; FEARNSIDE, P. M. Pasture burning in Amazonia: Dynamics of residual biomass and the storage and release of aboveground carbon. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 101, p. 25847–25857, 1996.

BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics**. 2 ed. New York: Wiley - Interscience, 1997. 849 p.

BÉLANGER, N.; PINNO, B. D. Carbon sequestration, vegetation dynamics and soil development in the Boreal Transition ecoregion of Saskatchewan during the Holocene. **Catena**, v. 74, p. 65–72, 2008.

BIRD, M. I.; CALI, J. A. A million-year record of fire in sub-Saharan Africa. **Nature**, v. 394, p. 767–769, 1998.

BISCHOFBERGER, S. Black Carbon in the Soil Carbon Cycle: Is it an Oxidation Resistant End-Product? **Institute of Biogeochemistry and Pollution Dynamics**. 2008.

BOENI, M. Proteção física da matéria orgânica em Latossolos sob sistemas com pastagens na região do Cerrado Brasileiro. 2007. 136p. **Tese** (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, [2007].

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional - BEN 2000**. Brasília: 2000. 154 p.

BRODOWSKI, S.; AMELUNG, W.; HAUMAIER, L.; ABETZ, C.; ZECH, W. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. **Geoderma**, v. 128, p. 116–129, 2005.

BRODOWSKI, S.; JOHN, B.; FLESSA, H.; AMELUNG, W. Aggregate-occluded black carbon in soil. **European Journal of Soil Science**, v.57, p.539-546, 2006.

BRODOWSKI, S.B. Origin, function, and reactivity of black carbon in arable soil environment. 2004. **Phd thesis**, University of Bayreuth, Bayreuth, Germany. [2004].

BROWN, R. Biochar Production Technology. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds). **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**, Earthscan, 2009.

CACHIER, H. P.; BREMOND, M. P.; BUAT-ME'NARD, P. Determination of atmospheric soot carbon by a simple thermal method. **Tellus**, v. 41B, p. 379– 390, 1989b.

CACHIER, H.; BREMOND, M.P.; BUAT-ME'NARD, P. Thermal separation of soot carbon. **Aerosol Science and Technology**, v. 10, p. 358–364, 1989a.

CARVALHO, E. R. **Investigação sobre incandescência em madeira**. São José dos Campos: INPE, p. 81, 1999.

CARVALHO, J. A.; LACAVALA, P. T. **Emissões em processos de combustão**. São Paulo: Editora Unesp, 2003.

CHEFETZ, B.; SALLOUM, M.J.; DESHMUKH, A.P.; HATCHER, P.G. Structural components of humic acids as determined by chemical modifications and carbon-13 NMR, pyrolysis-, and thermochemolysis-gas chromatography/mass spectrometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 4, p. 1159–1171, 2002.

CHENG, C. H.; LEHMANN, J.; J. THIES, E.; BURTON, S.D.; ENGELHARD, M.H. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. **Organic Geochemistry**, v. 37, p. 1477–1488, 2006.

CHOW, J. C.; WATSON, J. G.; CROW, D.; LOWENTHAL, D. H.; MERRIFIELD, T. Comparison of IMPROVE and NIOSH carbon measurements. **Aerosol Science and Technology**, v. 34, n. 1, p. 23–34, 2001.

CHOW, J. C.; WATSON, J. G.; PRITCHETT, L. C.; PIERSON, W. R.; FRAZIER, C. A.; PURCELL, R. G. The dri thermal optical reflectance carbon analysis system - description, evaluation and applications in united-states air-quality studies. **Atmospheric Environment Part a-General Topics**, v. 27, n. 8, p. 1185–1201, 1993.

COLOMBO, S.; PIMENTA, A.; HATAKEYAMA, K. Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo sustentável. In: Simpósio de Engenharia de Produção, 13. Bauru. **Anais...** Bauru: Universidade Estadual Paulista, p. 8, 2006.

CORNELISSEN, G.; GUSTAFSSON, O.; BUCHELI, T. D.; MICHIEL, T. D. B.; JONKER, T. O.; KOELMANS, A. A.; VAN NOORT, P. C. M. Extensive Sorption of Organic Compounds to Black Carbon Coal and Kerogen in Sediments and Soils: Mechanisms and Consequences for Distribution, Bioaccumulation and Biodegradation. **Environmental Science Technology**, v. 39, n. 18, p. 6881-6895, 2005.

CRUTZEN, P. J; ANDREAE, M. O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, v. 250, p. 1669, 1990.

CZIMCZIK, C. I. Quantification and characterization of black carbon in soils of Siberian Scots pine forests. 2003. **Thesis**. Friedrich-Schiller-Universitat, Jena. [2003].

CZIMCZIK, C. I.; MASIELLO, C. A. Controls on black carbon storage in soils. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 21, GB3005. doi:10.1029/2006GB002798, 2007.

CZIMCZIK, C. I.; PRESTON, C. M.; SCHMIDT, M. W. I.; SCHULZE, E. Effects of charring on mass, organic carbon, and stable carbon isotope composition of wood, **Organic Geochemistry**, v. 33, p. 1207 – 1223, doi:10.1016/S0146-6380(02)00137-7, 2002.

CZIMCZIK, C. I; PRESTON, C. M; SCHMIDT, M. W. I; SCHULZE, E. How surface fire in Siberian Scots pine forests affects soil organic carbon in the forest floor: Stocks, molecular structure, and conversion to black carbon (charcoal). **Global Biogeochemical Cycles**, v 17, n. 1, p. 1-14, 2003.

De La ROSA, J. M.; GONZÁLEZ-VILA, F. G.; POLVILHO, O.; GONZÁLEZ-PÉREZ, J. A.; De ANDRÉS, J. R. Strategies for the isolation and molecular characterization

of Black carbon. 9<sup>h</sup> Latinoamerican Meeting on Organic Geochemistry. **Book of abstracts**, p. 41-42, 2005.

De MORAES, J. F. L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon Forest and changes due to pasture installation in Rondonia, Brazil. **Geoderma**, v. 70, p. 63-81, 1996.

DIXON, R. K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; SOLOMON, A. M.; TREXLER, M.C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux global forest ecosystems. **Science**, v. 263, n. 5169, p. 185-190, 1994.

DRUFFEL, E. R. M. Comments on the importance of black carbon in the global carbon cycle. *Marine Chemistry* 92. **Elsevier**, p. 197– 200, 2004.

DUEÑAS, R. S. **Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel. Guadalajara.** Universidad de Guadalajara. ed.1, 1997. 293 p.

EGLINTON, T. I.; REPETA, D. J. Organic matter in the contemporary ocean. In *Treatise on Geochemistry*. New York: **Elsevier**, vol. 6, p. 145-180, 2003.

ELIAS, V.O. Evaluating Levoglucan as an indicator of biomass burning in Carajas, Amazonia: a comparison to the charcoal record. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 65, n. 2, p. 267– 272, 2001.

ELMQUIST, M.; GUSTAFSSON, O.; ANDERSSON, P. Quantification of sedimentary black carbon using the chemothermal oxidation method: an evaluation of ex situ pretreatments and standard additions. **Limnology Oceanography: Methods**, v. 2, p. 417– 427, 2004.

ELMQUIST, M.; ZENCAK, Z.; GUSTAFSSON, O. A. 700 year sediment record of black carbon and polycyclic aromatic hydrocarbons near the EMEP air monitoring station in Aspöreten, Sweden. **Environmental Science Technology**, v. 41, p. 6926-6932, 2007.



ENDO, S.; GRATHWOHL, P.; HADERLEIN, S. B.; SCHMIDT, T. C. LFERs for Soil Organic Carbon-Water Distribution Coefficients (KOC) at Environmentally Relevant Sorbate Concentrations. **Environmental Science Technology**, v. 43, p. 3094–3100, 2009.

FAO. **Forestry Paper**, v. 147, p. 350. FAO, Rome, 2006.

FEARNSIDE, P. M. Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**, v. 16, n. 44, 2002.

FEARNSIDE, P. M.; GRÁÇA, P. M. L. A.; FILHO, N. L.; RODRIGUES, F. J. A.; ROBINSON, J. M. Tropical forest burning in Brazilian Amazonia: measurement of biomass loading, burning efficiency and charcoal formation at Altamira, Para. **Forest Ecology and Management**, v. 123, p. 65–79, 1999.

FEARNSIDE, P. M.; GRÁÇA, P. M. L. A.; RODRIGUES, F. J. A. Burning of Amazonian rainforests: burning efficiency and charcoal formation in forest cleared for cattle pasture near Manaus, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 146, p. 115–28, 2001.

FEARNSIDE, P. M.; JUNIOR, L. N.; FERNANDES, F. M. Rainforest burning and the global carbon budget: biomass combustion efficiency and charcoal formation in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 98, n. D9, p. 16733–1643, 1993.

FEARNSIDE, P. M. Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. **Nature Climate Change**, v. 46, p. 115–58, 2000.

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

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. Berlin. Walter de Gruyter, 1989.

FILHO, A. T. Viabilidade técnica e ambiental da utilização de resíduos de madeira para produção de um combustível alternativo, 2005. 61p. **Dissertação** (Mestrado em

Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. [2005].

FORBES, M. S.; RAISON, R. J.; SKJEMSTAD, J. O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. **Science of the Total Environment**, v. 370, p. 190-206, 2006.

FREITAS, J. L. Sistemas Agroflorestais e sua utilização como instrumento de uso da terra: o caso dos pequenos agricultores da ilha de Santana, Amapá, Brasil. 2008, p. 246. **Tese** (Doutorado em Ciências Agrárias, área de concentração em Agroecossistemas da Amazônia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, [2008].

GÉLINAS, Y.; PRENTICE, K. M.; BALDOCK, J. A.; HEDGES, J. I. An improved thermal oxidation method for the quantification of soot/graphitic black carbon in sediments and soils. **Environmental Science and Technology**, v. 35, p. 3519–3525, 2001.

GILLESPIE, R. **On the use of oxidation for AMS sample pretreatment. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v. B52, p. 345–347, 1990.

GLASER, B.; BALASHOV, E.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZERCH, W. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. **Organic Geochemistry**, v. 31, p. 669-678, 2000.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, p. 219-230, 2002.

GLASER, B.W.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Black carbon in soils: the use of benzenecarboxylic acids as specific markers. **Organic Geochemistry**, v. 29, p. 811-819, 1998.

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The ‘Terra Preta’ phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, p. 37–41, 2001.

GOLDBERG, E. D. *Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution*. A **Wiley-Interscience Publication**, John Wiley & Sons: New York. p.1-198, 1985.

GONZÁLES-PÉREZ, J. A.; GONZÁLES-VILA, F. J.; ALMENDROS, G.; KNICKER, H. The effect of fire on soil organic matter – a review. **Environment International**, v. 30, p. 855-870, 2004.

GRAÇA, P. M.; FEARNSIDE, P. M.; CERRI, C. C. Burning of Amazonian forest in Ariquemes, Rondônia, Brazil: charcoal formation and burning efficiency. **Forest Ecology and Management**. v. 120, n.1-3, p. 179-191, 1999.

GRIFFEN, J. J.; GOLDBERG, E. D. The fluxes of elemental carbon in coastal marine sediments. **Limnology Oceanography**, v. 20, p. 456–63, 1983.

GUSTAFSSON, O.; BUCHELI, T. D.; KUKULSKA, Z.; ANDERSSON, M.; LARGEAU, C.; ROUZAUD, J. N.; REDDY, C. M.; EGLINTON, T. I. Evaluation of a protocol for the quantification of black carbon in sediments. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 15, n. 4, p. 881–890, 2001.

GUSTAFSSON, O.; HAGHSETA, F.; CHAN, C.; MACFARLANE, J.; GSCHWEND, P. M. Quantification of the dilute sedimentary soot phase: implications for PAH speciation and bioavailability. **Environmental Science and Technology**, v. 31, n. 1, p. 203–209, 1997.

HABERSTRO, H. P. R.; BRANDES, J. A.; GELINA, S. Y.; DICKENS, A. F.; WIRICK, S.; CODY, G. Chemical composition of the graphitic black carbon fraction in riverine and marine sediments at submicron scales using carbon X-ray spectromicroscopy. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 70, p. 1483–1494, 2006.

HAMER U.; MARSCHNER, B.; BRODOWSKI, S.; AMELUNG, W. Interactive priming of black carbon and glucose mineralization. **Organic Geochemistry**, v. 35, p. 823–830, 2004.

HAMMES, K.; SCHMIDT, M. W. I.; SMERNIK, R. J.; CURRIE, L. A.; BALL, W. P.; NGUYEN, T. H.; LOUCHOUARN, P.; HOUEL, S.; GUSTAFSSON, O.; ELMQUIST,

M.; CORNELISSEN, G.; SKJEMSTAD, J. O.; MASIELLO, C. A.; SONG, J.; PENG, P.; MITRA, S.; DUNN, J. C.; HATCHER, P. G.; HOCKADAY, W. C.; SMITH, D. M.; HARTKOPF-FRODER, C.; BÖHMER, A.; LÜER, B.; HUEBERT, B. J.; AMELUNG, W.; BRODOWSKI, S.; HUANG, L.; ZHANG, W.; GSCHWEND, P. M.; FLORES CERVANTES, D. X.; LARGEAU, C.; ROUZAUD, J. N.; RUMPEL, C.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; RODIONOV, A.; GONZALEZ VILA, F. J.; GONZALEZ PEREZ, J. A.; LA ROSA, J. M.; MANNING, D. A. C.; LÓPEZ CAPÉL, E.; DING, L. Comparison of quantification methods to measure fire-derived (black/elemental) carbon in soils and sediments using reference materials from soil, water, sediment and the atmosphere. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 21, p. 1-8, 2007.

HAN, Y. M.; CAO, J. J.; POSMENTIER, E. S.; CHOW, J. C.; WATSON, J. G.; FUNG, K.K.; JIN, Z.D.; LIU, S.X.; AN, Z.S. The effect of acidification on the determination of elemental carbon, char and soot-elemental carbon in soils and sediments. **Chemosphere**, v. 75, p. 92–99, 2009.

HERRING, J. R. Charcoal fluxes into sediments of the North Pacific ocean: the Cenozoic record of burning. In: Sundquist, E. T.; Broecker, W. (Eds.). **The Carbon cycle and atmospheric CO<sub>2</sub>: Natural variation Archean to present**. American Geophy, 1985.

HOSSAIN, K. M.; STREZOV, V.; YIN CHAN, K.; ZIOLKOWSKI, A.; NELSON, F. P. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 223-228, 2011.

HOUGHTON, R. A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. **Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology**, v. 51, p. 298-313, 1999.

HOUGHTON, Y.; DING, D. J.; GRIGGS, M.; NOGUER, P. J.; VAN DER LINDEN; J. T .; XIAOSU, D. (Ed.). **Climate Change: The Scientific Basis**. Cambridge: IPCC, p. 881 p, 2001.

HUNTZICKER, J. J.; JOHNSON, R. L. J. J. S.; CARY, R. A. Analysis of organic and elemental carbon in ambient aerosol by a thermal-optical method. In: WOLFF, G.T.;

KLIMISCH, R.L. (Eds.), Particulate Carbon: Atmospheric Life Cycle. **Plenum Press**, New York, p. 79–88, 1982.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. **Celulose e Papel**. São Paulo. v. 1, ed. 2, 1988.

JANTALIA, C. P.; RESCK, D. V. S.; ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Tillage effect on C stocks of a clayey Oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado region. **Soil & Tillage Research**, v.95, n.1, p.97-109, 2007.

JENKINS, B.M.; BAXTER, L.L.; MILES Jr., T.R.; MILES, T.R.; Combustion Properties of Biomass. **Fuel Processing Thecnology**, v. 54, p. 17-46, 1998.

JUNIOR, G. B. **Estudo da qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. proveniente de árvores adultas atingidas por incêndio florestal**. 1999. p. 190. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná. [1999].

KANG, M. **Quantification of soil organic carbon using mid- and near-drift spectroscopy**. 2002. Thesis. Office of Graduate Studies of Texas A&M University. August. [2002].

KARAPANAGIOTI, H. K.; CHILDS, J.; SABATINI, D. A. Impacts of heterogeneous organic matter on phenanthrene sorption: different soil and sediment samples. **Environmental Science and Technology**, v. 35, n. 23, p. 4684–4690, 2001.

KARAPANAGIOTI, H. K.; KLEINEIDAM, S.; SABATINI, D. A.; GRATHWOHL, P.; LIGOUIS, B. Impacts of heterogeneous organic matter on phenanthrene sorption: equilibrium and kinetic studies with aquifer material. **Environmental Science and Technology**, v. 34, n. 3, p. 406–414, 2000.

KATO,O.R.; KATO, M. S. A.; CARVALHO, C. J. R.; FIGUEIREDO, R. O.; CAMARÃO, A. P.; SÁ, T. D. A. ; DENICH, M.; VIELHAUER, K. Uso de agroflorestas no manejo de florestas secundárias. In: GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; FREITAS, M. S. M.; VIANA, A. P.; JASMIN, J. M.; MARCIANO, C.

R.; CARNEIRO, J. G. A. (Org.). **Sistemas Agroflorestais: Bases Científicas para o Desenvolvimento Sustentável**. Campos dos Goytacazes, RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, p. 119-138, 2006.

KAUFFMAN, J.; CUMMINGS, D.; WARD, D.; RABBIT, R. Fire in the Brazilian Amazon: 1. Biomass, nutrient pools and losses in slashed primary forests. **Oecologia**, v. 104, p. 397–408, 1995.

KIM, S.; KAPLAN, L. A.; BENNER, R.; HATCHER, P. G. Hydrogen-deficient molecules in natural riverine water samples—evidence for the existence of black carbon in DOM. **Marine Chemistry**, v. 92, p. 225–234, 2004.

KNICKER, H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. **Biogeochemistry**, v. 85, p. 91-118, 2007.

KNICKER, H.; ALMENDROS, G.; GONZALEZ-VILA, F.J.; GONZALES-PEREZ, J.A. & POLVILLO, O. Characteristic alterations of quantity and quality of soil organic matter caused by forest fires in continental Mediterranean ecosystems: A solid-state <sup>13</sup>C NMR study. **European Journal of Soil Science**, v. 57, p. 558-569, 2006.

KOELMANS, A. A.; JONKER, M. T. O.; CORNELISSEN, G.; BUCHELI, T. D.; VAN NOORT, P. C. M.; GUSTAFSSON, O. Black carbon: The reverse of its dark side. **Review Chemosphere**, v. 63: p. 365–377, 2006.

KRALOVEC, A. C.; CHRISTENSEN, E. R.; VAN CAMP, R. P. Fossil Fuel and Wood Combustion As Recorded by Carbon Particles in Lake Erie Sediments 1850–1998. **Environmental Science Technology**, v. 36, n. 7, p. 1405-1413, 2002.

KRULL, E. S; SKJEMSTAD, J. O.  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  profiles in <sup>14</sup>C-dated Oxisol and Vertisols as a function of soil chemistry and mineralogy. **Geoderma**, v. 1890, p. 1–29, 2002.

KUBICKI, J. D.; APITZ, S. E. Models of natural organic matter and interactions with organic contaminants. **Organic Geochemistry**, p. 911-927, 1999.

KUHLBUSCH, T. A. J. Method for determining black carbon in residues of vegetation fires. **Environmental Science and Technology**, v. 29, p. 2695–2702, 1995.

KUHLBUSCH, T. A. J.; ANDREAE, M. O. ; CACHIER, H.; GOLDAMMER, J. G.; LACAUX, J.-P.; SHEA, R.; CRUTZEN, P. J. Black carbon formation by savanna fires: Measurements and implications for the global carbon cycle, **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 101, n. 23, p. 651–23,665, 1996.

KUHLBUSCH, T. A. J.; CRUTZEN, P. J. Toward a global estimate of black carbon in residues of vegetation fires representing a sink of atmospheric CO<sub>2</sub> and a source of O<sub>2</sub>. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 9, n. 4, p. 491–501, 1995.

KUHLBUSCH, T.A.J., CRUTZEN, P.J. Black carbon, the global carbon cycle, and atmospheric carbon dioxide. In: Levine, J.S. (Eds.). **Biomass Burning and Global Change**, p. 160–169, 1996.

KURTH, V. J.; MACKENZIE, M. D.; DeLUCA, T.H. Estimating charcoal content in forest mineral soils. **Geoderma**, v. 137, p. 135-139, 2006.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Elsevier: Science Direct**, v. 123, p. 1-22, 2004.

LEFEVRE, A. H. **Gas Turbine Combustion**. Bristol, PA: Taylor e Francis, 1983.

LEHMANN, J.; CZIMCZIK, C.; LAIRD, D.; SOHI, S. Stability of biochar in the soil. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.) **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**, 2009.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems-A review. Mitig. Adapt. Strat. **Global Change Biology**, v. 11, p. 403-427, 2006.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Environmental Management. An Introduction. In: **Science and Technology**, Earthscan, London, 2009.

LEI, H.; REN, S.; JULSON, J. The effects of reaction temperature and time and particle size of corn stover on microwave pyrolysis. **Energy & Fuels**, v. 23, p. 3254-3261, 2009.

LEIFELD, J. Thermal stability of black carbon characterised by oxidative differential scanning calorimetry. **Organic Geochemistry**, v. 38, p. 112–127, 2007.

LEWIN, M.; GOLDSTEIN, I.S. **Wood structure and composition**. New York, Marcel Dekker, p. 488, 1991.

LIM, B.; CACHIER, H. Determination of black carbon by chemical oxidation and thermal treatment in recent marine and lake sediments and Cretaceous-Tertiary clays, **Chemical Geology**, v. 131, p. 143–154, 1996.

LIMA, A. J. N.; TEIXEIRA, L. M.; CARNEIRO, V. M. C.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Floresta secundária da região de Manaus-AM, dez anos após corte raso seguido de fogo. **Acta Amazônica**. v. 37, n. 1, p. 49-54, 2007.

LOPEZ-CAPEL, E.; SOHI, S. P.; GAUNT, J. L.; MANNING, D. A. C. Use of thermogravimetry-differential scanning calorimetry to characterize modelable soil organic matter fractions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 1, p. 136–140, 2005.

MACKENSEN, J.; HÖLSCHER, D.; KLINGE, R.; FÖLSTER, H. Nutrient transfer to the atmosphere by burning of debris in eastern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 86, p. 121- 128, 1996.

MALHI, Y.; BALDOCCHI, D. D.; JARVIS, P. G. The carbon balance of tropical, temperate and 620 boreal forests. **Plant Cell and Environment**, v. 22, p. 715-740, 1999.

MANNINO, A.; HARVEY, R. Black carbon in estuarine and coastal ocean dissolved organic matter. **Limnology Oceanography**, v. 49, v. 3, p. 735–740, 2004.

MARTIN, J.; **Biomassa energética: Combustão de Biomassa**. UCL: Louvain Bélgica. I Escola de combustão. Florianópolis – SC, 2007.



MASIELLO, C. A. New directions in black carbon organic geochemistry. **Marine Chemistry**, v. 92, p. 201–213, 2004.

MASIELLO, C. A.; DRUFFEL, E. R. M. Organic and black carbon  $^{13}\text{C}$  and  $^{14}\text{C}$  through the Santa Monica basin sediment oxic-anoxic transition. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 4, 2003.

MCT - **Ministério de Ciência e Tecnologia**, 1998. Disponível em: <[www.mct.gov.br](http://www.mct.gov.br)>. Acesso em: 13 de set. 2012.

MENICONI, M. F. G. **Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos no Ambiente: Diferenciação de fontes em sedimentos e metabólitos em bile de peixes**. Natal, 213 p., 2007. Tese de Doutorado em Química – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. [2007].

MERINO, A. The role of forests in mitigating climate change. In: EVELPIDOU, N.; DE FIGUEIREDO, T. (Ed.). **Soil protection in sloping Mediterranean agri-environments: lectures and exercises**. Instituto Politécnico de Bragança, Portugal. p. 265-290, 2009.

MIDDELBURG, J. J.; NIEUWENHUIZE, J.; VANBRUEGEL, P. Black carbon in marine sediments. **Marine Chemistry**, v. 65, p. 3-4, p. 245-252, 1999.

MIKUTA, R.; KLEBER, M.; KAISER, K.; JAHN, R. Review: Organic matter removal from soils using hydrogen peroxide, sodium hypochlorite, and disodium peroxodisulfate. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 120-135, 2005.

MURAGE, E. W., VORONEY, P.; BEYAERT, R. P. Turnover of carbon in the free light fraction with and without charcoal as determined using the  $^{13}\text{C}$  natural abundance method. **Geoderma**, v. 138, p. 133–143, 2007.

NGUYEN, B. T.; LEHMANN, J. Black carbon decomposition under varying water regimes, **Organic Geochemistry**, v. 40, p. 846-853, 2009.

NGUYEN, T. H.; BROWN, R. A.; BALL, W. P. An evaluation of thermal resistance as a measure of black carbon content in diesel soot, wood char, and sediment. **Organic Geochemistry**, v. 35, p. 217–234, 2004.

NIENHUYS, S.; AMATYA, S.; SHRESTHA, R. **Cooking Stove Improvements. Sustainable Technology Adaptative Research and Implementation Center.** Kathmandu, Nepal, 2005.

NÓBREGA, I. P. C. **Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: Sequestro de carbono no solo.** 2011, p. 45. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa. [2011].

NOORDWIJK, M. Van; CERRI, C.; WOOMER, P. L.; NUGROHO, K.; BERNOUX, M. Soil carbon dynamics in the humid tropical forest zone. **Geoderma**, v. 79, n. ¼, p. 187-225, 1997.

OHLERMILLER, T. J. Modeling of smoldering combustion propagation. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 11, n. 4, p. 277-310, 1985.

OLIVEIRA, E. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semiárido nordestino.** 2003, 122p, Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade Federal de Viçosa, [2003].

OTTMAR, R. D. Predicting fuel consumption by fire stages to reduce smoke from slash Fires. In: **1983, Annual Meeting proceedings of the Northwest Forest Fire Council.** Proceedings. Olympia, Washington, p. 87-106, 1983.

PEREIRA, C. A.; VIEIRA, I. C. G. A importância das florestas secundárias e os impactos de sua substituição por plantios mecanizados de grãos na Amazônia. **Interciência**, v. 26, n.8, p. 337-341, 2001.

PESSEDA, L. C. R.; GOUVEIA, S. E. M.; ARAVENA, R. Radiocarbon dating of total soil organic matter and humin fraction and its comparison with <sup>14</sup>C ages of fossil charcoal. **Radiocarbon**, v. 43, p. 595–601, 2001.

POIRIER, N.; DRENNE, S.; BALEDENT, J.; ROUZAUD, J. N.; MARIOTTI, A.; LARGEAU, C. Abundance and composition of the refractory organic fraction of an ancient, tropical soil (Pointe Noire Congo). **Organic Geochemistry**, v. 33, p. 383-391, 2002.

PONCE-HERNANDEZ, R. Assessing the carbon stock and carbon sequestration potential of current and potential land use systems and the economic rationality of land use conversions. In: Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean. **World Soil Resources Report**, 86. FAO, Rome. p 77-92, 1999.

PRESTON C. M.; SCHMIDT, M. W. I. Black (pyrogenic) carbon in boreal forests: a synthesis of current knowledge and uncertainties. **Biogeosciences**, v. 3, p. 211–271, 2006.

PURI, I.K. (ed). **Environmental implications of combustion processes**. Boca Raton: CRC, 1993.

QUÉNÉA, K.; DERENNE, S.; LARGEAU, C.; RUMPEL, C.; MARIOTT, A. Spectroscopia and pyrolytic features and abundance of the macromolecular refractory fractions in a sandy acid forest soil (Landes de Gascogne, France). **Organic Geochemistry**, v. 36: p. 349-362, 2005.

REDDY, C. M.; PEARSON, A.; XU, L.; MCNICHOL, A. P.; BENNER, B. A.; WISE, S. A.; KLOUDA, G. A.; CURRIE, L. A.; EGLINTON, T. I. Radiocarbon as a tool to apportion the sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon in environmental samples. **Environmental Science and Technology**, v. 36, n. 8, p. 1774–1782, 2002.

ROBERT, M. Soil carbon sequestration for improved land management. World Soil Resources Reports. **World Soil Resources Report**, 96. FAO, Rome. ISSN 0532-0488, 2001.

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

RUMPEL, C.; ALEXIS, M.; CHABBI, A.; CHAPLOT, V.; RASSE, D. P.; VALENTIN, C.; MARIOTTI, A. Black carbon contribution to soil organic matter

composition in tropical sloping land under slash and burn agriculture. **Geoderma**, v. 130, p. 35-46, 2006b.

RUMPEL, C.; CHAPLOT, V.; CHABBI, A.; LARGEAU, C.; VALENTIN, C. Stabilisation of HF soluble and HCL resistant organic matter in sloping tropical soils under slash and burn agriculture. **Geoderma**, v. 145, p. 347-354, 2008.

RUMPEL, C.; CHAPLOT, V.; PLANCHON, O.; BERNADOU, J.; VALENTIN, C.; MARIOTTI, A. Preferential erosion of black carbon contribution on steep slopes with slash and burn agriculture. **Catena**, v. 65, p. 30-40, 2006a.

SALDARRIAGA, J. G; WEST. D. C. Holocene fires in the northern Amazon basin. **Quaternary Research**, v. 26, p. 358-66, 1986.

SAMPAIO, R. S.; MELLO, M. G. Produção de metais com biomassa plantada. **Biomassa - Energia dos Trópicos em Minas Gerais**. Belo Horizonte: LabMídia/FAFICH, p.163-178, 2001.

SCHMIDT, M. W. I.; NOACK, A. G. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges (review). **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, p. 77-79, 2000.

SCHMIDT, M. W. I.; SKJEMSTAD, J. O.; CZIMCZINK, C. I.; GLASER, B.; PRENTICE, K. M.; GELINAS, Y.; KULBEUSCH, T. A. Comparative analysis of black carbon in soil. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 15, p. 163-167, 2001.

SCHMIDT, M. W. I.; SKJEMSTAD, J. O.; JGER, C. Carbon isotope geochemistry and nanomorphology of soil black carbon: black chernozemic soils in central Europe originate from ancient biomass burning. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, p. 4, 2002.

SCHMIDT, M. W. J.; SKJEMSTAD, E; GEHRT, E.; KÖEL-KNABNER, I. Charred organic carbon in German chernozemic soils. **European Journal of Soil Science**, v. 50, p. 351-365, 1999.

SEILER, W.; CRUTZEN, P. J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. **Climatic Change**, v. 2, p. 207-247, 1980.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a tropical oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density and magnetic fractionations. **Soil Science**, v. 162, n.11, p. 795-807, 1997.

SIMPSON, M. J.; HATCHER, P. G. Determination of black carbon in natural organic matter by chemical oxidation and solid-state  $^{13}\text{C}$  nuclear magnetic resonance spectroscopy. **Organic Geochemistry**, v. 35, p. 923-935, 2004.

SKJEMSTAD, J. O.; CLARKE, P.; TAYLOR, J. A.; OADES, J. A.; McCLURE, S. G. The chemistry and nature of protected carbon in soil. **Australian Journal of Soil Research**, v. 34, p. 251-271, 1996.

SKJEMSTAD, J. O.; DALAL, R. C.; JANIK, L. J.; MCGOWAN, J. A. Changes in chemical nature of soil organic carbon in Vertisols under wheat in southeastern Queensland. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 39, p. 343- 359, 2001.

SKJEMSTAD, J. O.; TAYLOR, J. A.; SMERNIK, R. J. Estimation of charcoal (char) in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 30, n. 15–16, p. 2289–2298, 1999.

SMERNIK, R. J.; SKJEMSTAD, J. O.; OADES, J. M. Virtual fractionation of charcoal from soil organic matter using solid state  $^{13}\text{C}$  NMR spectral editing. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, p. 665-683, 2000.

SMITH, D. W.; GRIFFIN, J. J.; GOLDBERG, E. D. A spectroscopic method for the quantitative determination of elemental carbon. **Analytical Chemistry**, v. 47, p. 233–238, 1975.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, v. 74, p. 65-105, 1996.

SONG, J. Z.; PENG, P. A.; HUANG, W. L. Black carbon and kerogen in soils and sediments. 1. Quantification and characterization. **Environmental Science and Technology**, v. 36, n. 18, p. 3960–3967, 2002.

STOCKS, B. J.; KAUFFMAN, J. B. Biomass consumption and behavior to wildland fires in boreal, temperate, and tropical ecosystems: parameters necessary to interpret historic fire regimes and future fire scenarios. In: CLARK, J. S, CACHIER, H.; GOLDAMMER, J. G; STOCKS, B. (ed). Sediment records of biomass burning and global change. NATO ASI Series. Series I, **Global Environmental Change**, vol. 51. Berlin, Germany: Springer, p. 169–88, 1997.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: struture, proprieties, utilization**. New York, Van Nostrand Reinold, 1991. p. 494

TURPIN, B. J.; CARY, R. A.; HUNTZICKER, J. J. An insitu, time-resolved analyzer for aerosol organic and elemental carbon. **Aerosol Science and Technology**, v. 12, n. 1, p. 161–171, 1990.

Van WYLEN. G. J.; SONNTAG. R. E.; BORGNAKKE. C. **Fundamentos da termodinâmica**. 5a edição. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 1998. 538 p.

WANDELLI, E. V. Estoques de biomassa em diferentes cenários de uso da terra ao norte de Manaus, Amazônia Central brasileira. 2008. **Tese** (doutorado) - INPA/UFAM, Manaus. [2008].

WANG, W. J.; DALAL, R. C.; MOODY, P. W.; SMITH, C. J. Relationships of soil respirator to microbial biomes, substrate availability and clay content. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35. n. 2, p. 273-284, 2003.

WOLFF, G. T.; KLIMISCH, R. L. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. Disponível em: <[www.ipccgip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html](http://www.ipccgip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html)>. Acesso em: 13 de set. de 2012.

WOOMER, P. L.; PALM, C. A.; QURESHI, J. N.; KOTTO-SAME, J. Carbon sequestration and organic resource management in African smallholder agriculture. In: LAL,

R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B. A. (eds.) **Soil Processes and the Carbon Cycle**. CRC Press, Boca Raton, FL. p. 153-173, 1998.

WRIGHT, M. M.; BROWN, R. C.; BOATENG, A. A. Distributed processing of biomass to bio-oil for subsequent production of Fischer-Trapsch liquids. **Biofuels, Bioprocessing and Biorefining**, v. 2, p. 229-238, 2008.

YU, J.Z.; XU, J.H.; YANG, H. Charring characteristics of atmospheric organic particulate matter in thermal analysis. **Environmental Science and Technology**, v. 36, n. 4, p. 754–761, 2002.

YU, J.Z.; YANG, H. Uncertainties in charring correction in the analysis of elemental and organic carbon in atmospheric particles by thermal/optical methods, **Environmental Science and Technology**, v. 36, n. 23, p. 5199–5204, 2002.

**Estimativa da concentração de carbono preto em solos da Amazônia Oriental por  
digestão em ácido nítrico fraco e peróxido de oxigênio**

Adriana Rocha da PIEDADE<sup>1</sup>; Christoph GEHRING<sup>1</sup>; Márcio Fernandes Alves  
LEITE<sup>1</sup>; Guillaume Xavier ROUSSEAU<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), Caixa Postal 3004, São Luís, Maranhão, Brasil. E-mail: adryarp@hotmail.com; christophgehring@yahoo.com.br; leitemfa@gmail.com; guilirous@yahoo.com.br



## **Estimativa da concentração de carbono preto em solos da Amazônia Oriental por digestão em ácido nítrico fraco e peróxido de oxigênio**

**RESUMO** - A escolha de um método eficaz com características de baixo custo e de fácil aplicação para a maioria dos laboratórios, principalmente em áreas com diferentes históricos de uso, intensidade e frequência do fogo, como os solos tropicais, é de grande interesse. É difícil comparar as estimativas existentes sobre as quantidades de carbono preto devido este ser obtido por diferentes métodos. O objetivo deste estudo foi verificar a utilidade do método descrito por Kurth *et al.* (2006), para a estimativa da concentração de carbono preto em perfis do solo entre 0 a 1 metro de profundidade em ecossistemas contrastantes na Amazônia Oriental com diferentes históricos de uso e frequência de fogo. O experimento foi realizado em áreas compreendendo quatro capoeiras baixas (4-7 anos), quatro capoeiras médias (11-15 anos), duas capoeiras altas (20-40 anos), cinco florestas primária e um pasto, concentrados em 4 ‘núcleos’ no norte do Maranhão e sul do Pará. O uso do fogo possui efeito significativo apenas na primeira camada dos solos amostrados. Os núcleos apresentam variação textural com o aumento da profundidade, o que implica na variação da densidade aparente do solo. Os maiores valores de densidade do solo favorecem a incorporação parcial do carbono preto na fração do complexo organo-mineral com proteção realizada pela argila. O teor de argila e a densidade podem contribuir para que o método Kurth *et al* (2006) tenha sua eficiência reduzida, com maior precisão para solos com maiores concentrações de carbono preto (>2%) e sem variação textural no perfil amostrado.

**Palavras-chave:** analítica, solo tropical, fogo.

**Estimation of the concentration of black carbon in soils of the Eastern Amazon  
by digestion in weak nitric acid and peroxide oxygen**

**ABSTRACT** – Choosing an effective method with features of low cost and easily applicable for most laboratories, particularly in areas with different histories of use, frequency and intensity of the fire, as tropical soils, is of major interest. It is difficult to compare existing estimates of the quantities of carbon black due to this being obtained by different methods. The aim of this study was to assess the usefulness of the method described by Kurth *et al.* (2006), to estimate the concentration of black carbon in soil profiles from 0 to 1 meter deep in contrasting ecosystems in the eastern Amazon with different historical usage and frequency of fire. The experiment was conducted in areas cleared tracts comprising four (4-7 years), four barns medium (11-15 years), two barns high (20-40 years), five primary forest and pasture, concentrates on 4 'cores' in northern Maranhao and southern Para. The use of fire has a significant effect only in the first layer of soil sampled. The cores show textural variation with increasing depth, which implies variation of the bulk density of the soil. The highest density of soil favor the partial incorporation of carbon black in the fraction of organo-mineral complex with protection held by clay. Clay content and density can contribute to the method Kurth *et al.* (2006) has reduced its efficiency, with greater accuracy for soils with higher concentrations of black carbon (> 2%) and no change in textural sampled profile.

**Keywords:** analytical, tropical soil, fire.

## INTRODUÇÃO

O carbono preto (C-preto) é resultante da combustão incompleta da vegetação (Schmidt e Noack 2000), e despertou interesse devido a sua forma estável de carbono que, além de proporcionar o seu sequestro no solo, apresenta propriedades agronômicas interessantes (Lehmann *et al.* 2006).

Desta forma, contribui para que o C-preto represente um significativo reservatório de carbono, já que a queima da vegetação e a combustão do carvão transferem carbono para o solo em longo prazo (Masiello 2004), através de partículas finas de C-preto, que se mistura ao solo (Czimczik *et al.* 2003).

O carbono preto afeta um elevado número de propriedades do solo com inúmeras finalidades relacionadas à sua qualidade, pelas melhorias na qualidade física (redução da densidade, aumento da infiltração, aeração, retenção de água e nutriente), pelo aumento da capacidade de troca de cátions, da retenção de fertilizantes, pela estimulação da atividade dos microrganismos como micorrizas e bactérias nos poros e da fixação biológica de nitrogênio (Glaser *et al.* 2002; Oguntunde *et al.* 2004; Glaser 2007; Rondon *et al.* 2007; Warnock *et al.* 2007; Van Zwieten *et al.* 2010; Karhu *et al.* 2011).

Os autores Czimczik e Masiello (2007) propuseram que um solo rico em C-preto é resultado de diversos fatores em conjunto. Dentre estes, temos o uso eficiente do fogo, seguido de um precursor aromático e de condições adequadas, como processos de adsorção e absorção para remover o C-preto da superfície e levá-lo para a subsuperfície.

A sorção no solo acaba por ser caracterizada como a combinação da absorção na matéria orgânica leve com a extensiva adsorção ao C-preto (Cornelissen *et al.* 2005; White 2005; Endo 2009), com isso, a matéria orgânica (MO) dissolvida é capaz de atuar como um importante meio de transporte (Haberstroh *et al.* 2006).

A distribuição das partículas do C-preto é influenciado pela natureza da biomassa, pelas condições da carbonização e por processos pedogenéticos e, assim, varia em função do tipo de solo (Glaser *et al.* 2000; 2001; Schmidt *et al.* 2002; Lei *et al.* 2009). As frações de solo com grãos mais finos possui uma superfície de adsorção mais elevada e tendem a apresentar uma maior afinidade que as frações de maior granulometria (Meniconi 2007).

Potenciais mecanismos de movimento do carbono preto no solo pode incluir o movimento de massas com argila e silte, e atividade biológica. Skjemstad *et al.* (1999a) mostraram que, essencialmente, todo o C-preto < 53  $\mu\text{m}$ . Assim, esta dividido em materiais que devem ser relativamente móvel e capaz de se mover na mesma porção do perfil, onde a argila e silte acumulam (Skjemstad *et al.* 1999b).

Concentrações superiores a 80% de C-preto produzido se depositam no solo com característica de recalcitrância, tornando-se fração mais antiga (Forbes *et al.* 2006; Preston e Schmidt 2006), que permanece a partir da sua estrutura aromática e proteção física por sua funcionalidade e ligação com complexos organo-minerais (Pessenda *et al.* 2001; Brodowski *et al.* 2005; Forbes *et al.* 2006; Rumpel *et al.* 2006; 2008).

Ocorrem discrepâncias em todas as técnicas analíticas disponíveis para a estimativa do C-preto, com teores e concentrações que variam em mais de um fator de 500 para a mesma amostra analisada por meio de métodos diferentes (Schmidt *et al.* 2001), pois, cada uma mede uma região diferente dentro do contínuo de combustão (Gélinas *et al.* 2001), deste modo impossibilita um consenso científico sobre o ‘método certo’ para sua determinação, a comparabilidade dos resultados gerados e a definição de compostos não pirogênicos como se fosse (Simpson e Hatcher 2004; Masiello 2004; Hammes *et al.* 2007). A tabela 4 mostra os teores de carbono preto em diferentes solos mundiais. Diante do exposto, torna-se necessária a estimativa de C-preto para compreender o balanço global nos ecossistemas, sobretudo no solo Amazônico, sua acumulação em estoques e os fatores que podem interferir, como o número

de queimadas, a influência do histórico de uso da terra, o teor de argila e a densidade do solo, em diferentes níveis e escalas de tempo, durante os vários estágios de desenvolvimento da vegetação após a conversão para sistemas agrícolas através de um método de referência padrão e adequado para a análise do C-preto no solo (Mikuta *et al.* 2005; Schmidt e Noack 2000).

Em outro contexto, surge a necessidade de se ter conhecimento sobre os efeitos quantitativos das queimadas na acumulação do C-preto em capoeiras de diferentes idades e da escolha de um método padrão confiável que sirva de atualização dos inventários nacionais das remoções por sumidouros de carbono (Wolff e Klimisch 2006), e como estratégia para o manejo adequado da terra e a diminuição do desmatamento na Amazônia Oriental.

Como alternativa temos a digestão por peróxido e ácido nítrico fraco para a oxidação de matéria orgânica que tem sido utilizado por diversos autores através de uma versão adaptada para isolar o carbono preto a partir da oxidação da matéria orgânica na fração de solo. Analiticamente simples, evita a perda durante as etapas de manipulação no processo de preparação para a digestão com características de eficácia, de baixo custo, de fácil manuseio, disponibilidade e repetibilidade de sua versão nos laboratórios (Kurth *et al.* 2006; Jantalia *et al.* 2007; Bélanger e Pinno 2008).

O objetivo deste estudo foi verificar a utilidade da digestão por peróxido de hidrogênio e ácido nítrico fraco como descrito por Kurth *et al.* (2006) adaptado, para a estimativa da concentração de carbono preto em solos no norte do Maranhão e sul do Pará na Amazônia Oriental com diferentes históricos de uso e frequência de fogo: floresta primária, capoeira de floresta primária, capoeira de pasto e sistema de corte e queima e com diferença textural.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Áreas de estudo**

O presente estudo foi realizado nos anos de 2011 e 2012 no centro norte do Maranhão e sul do Pará, localizados na Amazônia Oriental. Os quatro núcleos da região de estudo foram: Reserva Biológica do Gurupi, situada entre os municípios de Bom Jardim, Centro Novo do Maranhão e São João do Carú, no Maranhão; Fazenda Escola de São Luis, no município de São Luis, no Maranhão; Ilha de Livramento, no município de Alcântara, no Maranhão e Distrito de Quatro-Bocas, no município de Tomé-Açu, no Pará (Figura 2).

### **Amostragem, preparo das amostras e análises de solo**

Foi amostrado um total de 16 áreas: três capoeiras baixas (4-7 anos), quatro capoeiras médias (11-15 anos), duas capoeiras altas (20-40 anos), cinco florestas primárias e um pasto com diferentes frequências de queimas (Tabela 5). A classificação dos solos foi feita segundo a EMBRAPA (2006).

Em cada área foram abertas trincheiras de aproximadamente 1 x 1 m de superfície e 1 m de profundidade. A amostragem foi realizada nas profundidades de 0–5 cm, 5–10 cm, 20–30 cm, 50–60 cm e 90–100 cm em triplicata em cada trincheira (três perfis).

A retirada do solo para a densidade foi realizada através do uso de anéis volumétricos de aço e volume interno de 100 cm<sup>3</sup>, com três repetições por profundidade em cada um dos perfis. Nestas amostras foram determinadas a densidade do solo (Ds) e a porosidade total (Pt) (Thomasson 1978; Embrapa 1997).

Após coletas e secas ao ar o total de 255 amostras de solo foi destorroado e passado em peneiras de 2mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar, com repetições internas para cada uma das profundidades amostradas até um metro, a partir das quais foram realizadas ás

análises físicas e químicas, como preconiza o Manual de métodos analíticos da Embrapa (1997).

A determinação dos teores de matéria orgânica foi feito por colorimetria, de acordo com a metodologia Dakota do Sul adaptado, em comparação com resultados obtidos a partir de uma curva-padrão com dados de matéria orgânica determinada pelo método Walkley – Black (Quaggio e Raij 1979). O cálculo de carbono foi feito a partir dos resultados da matéria orgânica com divisão pelo fator de conversão 1,724 segundo a metodologia do Instituto Agrônômico de Campinas (Schumacher, 2002).

Para as concentrações do C-preto foram pesados 5 g de amostras de solo homogêneo para cada profundidade dos três perfis, previamente peneirado a 0,25 mm e moídas com a posterior transferência para Erlenmeyer de 250 ml, segundo a versão adaptada do método Kurth *et al.* (2006) pelo aumento no volume dos reagentes e da quantidade de solo amostrada. Utilizou-se 50 ml de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) a 1M e 100 ml de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) a 30%, em temperatura ambiente durante uma hora com agitação manual, após transferidos para a placa aquecedora durante 14 horas e retiradas para repouso. Se evidência de efervescência foi observada, as amostras eram recolocadas na placa aquecedora até completa digestão.

Após digestão completa as amostras foram filtradas em papel de filtro Whatman nº 2 e secas em estufa a 105° C durante 48 horas, sendo posteriormente transferidas para um dessecador com posterior retirada do solo com o auxílio de uma de espátula, almofariz e peneira de 53µm para evitar o desperdício do material. As análises dos teores totais de C e N foram feitas pelo método de combustão a seco, em autoanalisador, no laboratório de solos da Embrapa Agrobiologia (RJ), no qual as amostras são aquecidas a temperaturas geralmente por volta de 1300 °C em um fluxo de oxigênio puro e convertido em gases simples, como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> (Sleutel *et al.* 2007), que são separados por colunas de absorção específica e seu valor é determinado por sua condutibilidade térmica (Pérez *et al.* 2001, Sleutel *et al.* 2007).

### **Análises estatísticas**

Os dados foram analisados estatisticamente com auxílio do programa Statistica 8.0 (Statsoft 2008). A normalidade dos dados foi verificada com o teste X e os dados transformados quando necessário. As diferenças entre os usos/frequência de fogo e concentração de carbono preto/teor de argila foram testadas através de uma ANOVA unifatorial e as diferenças entre as medias determinadas pelo teste de Tukey.

O teste de Tukey ao nível de 5% foi utilizado para ver as diferenças entre as médias e quais núcleos foram significativamente diferentes entre si, para os dados paramétricos. A análise de regressão foi utilizada para as relações entre a concentração do carbono preto obtido nas amostras com as demais características do solo: variação textural de areia, silte, argila e densidade.

## **RESULTADOS**

### **Efeito da vegetação sobre a concentração de carbono preto**

Na figura 2, observa-se as análises dos efeitos das diferentes formas de uso do solo sobre os teores de C-preto a profundidade de 0-5 cm ( $p=0,0000$ ), não sendo detectado efeito significativo para as demais camadas amostradas.

Observa-se que a vegetação nativa apresenta uma concentração média de 0,46%, as maiores concentrações foram encontrados em solo de capoeira de apenas um ciclo de corte e queima, com um total de 0,77% de C-preto nas amostras de solo e as menores concentrações foram encontradas nas amostras de solo oriundos de capoeiras de vários ciclos de corte e queima, com valores de 0,19%.



### **Concentrações de carbono preto nos diferentes núcleos agrupados**

A Figura 3 apresenta as concentrações de carbono preto entre os núcleos agrupados Gurupi e Tomé-açú (A) e São Luis e Alcântara (B) em diferentes profundidades.

Observa-se que não ocorre diferença significativa entre as profundidades do núcleo agrupado São Luis e Alcântara (B) e sem diferença significativa em relação ao núcleo agrupado Gurupi e Tomé-açú (B).

O núcleo agrupado Gurupi e Tomé-açú (A) apresenta diferença significativa entre as profundidades 5-10 cm e 90-100 cm, no qual as maiores concentrações de carbono preto são encontradas na profundidade 0-5 cm e 90-100 cm.

### **Carbono preto e textura do solo**

A Figura 4 apresenta a correlação entre a concentração de carbono preto e o teor de argila do solo. É importante afirmar que os resultados obtidos da física do solo e não apresentados demonstram grande variação textural em todos os núcleos e para todas as profundidades amostradas.

O núcleo Gurupi apresenta conteúdo de areia total entre 2 a 38 %, silte entre 15 a 32% e argila entre 12 a 63 %. O núcleo Tomé-Açu, 26 a 40 % de areia total, entre 19 a 35 % de silte e 32 a 55% de argila. O núcleo Alcântara com variações entre 42 a 60 % de areia total, com 22 a 38 % de silte e 15 a 20% de argila.

O núcleo São Luis, com 25 a 38%, de areia total, com 24 a 27% de silte e 15 a 20% de argila. Esta grande variação textural dos solos amostrados foram a razão do grupamento dos núcleos de acordo com os maiores e menores teores de argila e areia.

O núcleo agrupado Gurupi e Tomé-açú apresentam as maiores concentrações de argila entre 0-5 cm e 50-60 cm e para o núcleo agrupado São Luis e Alcântara a camada 0-5 cm apresentou os maiores teores de areia fina com maiores teores em 20-30 cm.

Na profundidade entre 50-60 cm, ocorre uma variação negativa na qual o aumento do teor de argila do solo está relacionado a decréscimos na concentração de carbono preto numa variação de 31% e com diferença significativa ( $p=0,0405$ ). As demais profundidades (0-5 cm, 5-10 cm, 20-30 cm e 90-100 cm) não apresentaram relação entre as variáveis.

### **Carbono preto e densidade do solo**

Na figura 5, observa-se as concentrações de carbono preto e densidade do solo. Na profundidade entre 5-10 cm, ocorre uma variação negativa na qual o aumento do densidade aparente do solo está relacionado a decréscimos na concentração de carbono preto numa variação de 38% e com diferença significativa ( $p=0,0200$ ).

Observa-se ainda, que para a profundidade entre 20-30 cm, ocorre uma variação negativa na qual o aumento do densidade aparente do solo está relacionado a decréscimos na concentração de carbono preto numa variação de 17% e com diferença significativa ( $p=0,0111$ ) e para a profundidade entre 90-100 cm um aumento do densidade aparente do solo está relacionado a decréscimos na concentração de carbono preto numa variação de 44% e com diferença significativa ( $p=0,0074$ ).

## **DISCUSSÃO**

Os efeitos da vegetação e as diferentes formas de uso do solo sobre as concentrações de carbono preto estão associados à taxa de biomassa a ser queimada na superfície, na qual a conversão da floresta primária para áreas de sistemas agrícolas tendem a produzir uma maior quantidade de carbono preto, responsável pelas fontes primárias no solo (Griffin e Goldberg 1983; Goldberg 1985; Herring 1985; Kang 2002; Czimczik *et al.* 2003).

Em um cenário de queimadas ao longo de um período de 10 anos em solo tropical ocorre uma elevação da conversão da biomassa em carvão (Fearnside, 2002). Entretanto, se o uso do fogo se tornar contínuo ocorrem decréscimos na concentração de carbono preto (Stocks e Kauffman 1997; Fearnside 2002).

A justificativa apresentada por Knicker *et al.* (2006) e considerada por Kurth *et al.* (2006) para explicar a diminuição do carbono preto em áreas de uso frequente de fogo é o fato de o carvão presente no solo ser consumido por incêndios posteriores, que resulta em aumento na taxa de consumo do carbono preto nas frações de carvão presentes no solo, com redução na biomassa a ser carbonizada.

Os dados obtidos de concentração de carbono preto e a profundidade do solo estão relacionados à taxa de produção e capacidade de resistência do carbono preto a degradação, o que contribui para que o mesmo represente uma proporção enterrado nos solos (Schmidt e Noack 2000), tornando-se fração mais antiga na subsuperfície (Cope e Chaloner 1980; Herring 1985; Forbes *et al.* 2006; Preston e Schmidt, 2006), com proteção física devido à sua funcionalidade e ligação com complexos organo-minerais, como em frações de argila presentes no solo (Pessenda *et al.* 2001; Brodowski *et al.* 2005; Forbes *et al.* 2006; Rumpel *et al.* 2006).

É válido ressaltar que outros fatores podem influenciar estes resultados. No entanto, faltam dados relacionados a idade do carvão e conseqüentemente do carbono preto presente nestes solos para que se tenha uma resposta definitiva.

É relevante informar que Kurth *et al.* (2006) realizaram a oxidação da matéria orgânica por  $H_2O_2$  em solos que apresentam classificação textural conhecida. Os solos deste estudo apresentam variação textural segundo a profundidade amostrada, o que implica supor que a precisão de oxidação do método utilizado pode ser ineficiente para diversos tipos de solos. Se esta hipótese for verdadeira a oxidação com peróxido de hidrogênio apresenta o

mesmo problema de determinação que muitos dos métodos de quantificação de carbono preto (Simpson e Hatcher 2004; Hammes *et al.* 2007).

Vale ressaltar que os núcleos amostrados possuem grande variação textural e sob a ação de diferentes tipos de uso do solo o que implica em menores e maiores valores da densidade e teores de argila. As concentrações de carbono preto nos diferentes núcleos agrupados estimados entre a superfície e subsuperfície para os núcleos estudados e para os diferentes valores de densidade e teores de argila assemelham-se aos dados obtidos por Dargie (2010).

Os maiores valores de densidade do solo favorecem a incorporação parcial do carbono preto na fração do complexo organo-mineral com proteção nas camadas com maiores teores de argila contra a degradação abiótica e biótica e favorecem a sua permanência no solo.

O teor de argila e a densidade podem contribuir para que o método Kurth *et al* (2006) tenha sua eficiência reduzida, com maior precisão para solos com maiores concentrações de carbono preto (>2%) e sem variação textural no perfil amostrado.

## **CONCLUSÕES**

O uso do fogo possui efeito significativo apenas na primeira camada dos solos amostrados, porém, com o aumento da frequência das queimas tende a inibir a acumulação de carbono preto pelo decréscimo do material a ser carbonizado e consumo do carvão já existente.

Os núcleos apresentam diferentes tipos de uso do solo e variação textural com o aumento da profundidade, o que implica na variação da densidade aparente e teor de argila do solo. Os maiores teores de argila estão no núcleo agrupado Gurupi e Tomé-açu e os maiores teores de areia no núcleo agrupado São Luis e Alcântara.

Os maiores valores de densidade aparente do solo favorecem a incorporação parcial do carbono preto na fração do complexo organo-mineral com proteção realizada pela argila contra a degradação abiótica e biótica e favorecem a sua permanência no solo.

O teor de argila e a densidade podem contribuir para que o método Kurth *et al* (2006) tenha sua eficiência reduzida, com maior precisão para solos com maiores concentrações de carbono preto (>2%) e sem variação textural no perfil amostrado.

## BIBLIOGRAFIA CITADA

- Bélangier, N.; Pinno, B. D. 2008. Carbon sequestration, vegetation dynamics and soil development in the Boreal Transition ecoregion of Saskatchewan during the Holocene. *Catena*, 74: 65–72.
- Brodowski, S.; Amelung, W.; Haumaier, L.; Abetz, C.; Zech, W. 2005. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. *Geoderma*, 128: 116–129.
- Cope, M. J.; Chaloner, W. G. 1980. Fossil charcoal as evidence of past atmospheric composition. *Nature*, 283: 647–649.
- Cornelissen, G.; Gustafsson, O.; Bucheli, T.D.; Michiel, T.D.B.; Jonker, T.O.; Koelmans, A.A.; Van Noort, P.C.M. 2005. Extensive Sorption of Organic Compounds to Black Carbon Coal and Kerogen in Sediments and Soils: Mechanisms and Consequences for Distribution, Bioaccumulation and Biodegradation. *Environmental Science Technology*, 39 (18): 6881–689.
- Czimczik, C.I.; Masiello, C.A. 2007. Controls on black carbon storage in soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 21 (3): 34. GB3005. doi:10.1029/2006GB002798.
- Czimczik, C.I.; Preston, C.M.; Schmidt, M.W.I.; Schulze, E. 2003. How surface fire in Siberian Scots pine forests affects soil organic carbon in the forest floor: Stocks, molecular structure, and conversion to black carbon (charcoal). [Global Biogeochemical Cycles](#), 17 (1): 1–14.
- Dargie, G.C. 2010. *Assessing the Use of Hydrogen Peroxide Oxidation to Quantify Black Carbon in Amazonian Soils*. Dissertação de Mestrado. School of Agriculture, Food and Rural Development. United Kingdom. 65 p.
- Embrapa. 2006. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2da ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 306 p.
- Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997. *Manual de métodos de análise de solo*. 2da ed. Rio de Janeiro, 212. (EMBRAPA-CNPQ. Documentos, 1).
- Endo, S.; Grathwohl, P.; Haderlein, S. B.; Schmidt, T. C. 2009. LFERs for Soil Organic Carbon-Water Distribution Coefficients (KOC) at Environmentally Relevant Sorbate Concentrations. *Environmental Science Technology*, 43: 3094–3100.
- Fearnside, P.M. 2002. Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. *Estudos Avançados*, 16 (44): 99–123.
- Forbes, M.S.; Raison, R.J.; Skjemstad, J.O. 2006. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 370: 190–206.
- Gélinas, Y.; Prentice, K.M.; Baldock, J.A.; Hedges, J.I. 2001. An improved thermal oxidation method for the quantification of soot/graphitic black carbon in sediments and soils. *Environmental Science and Technology*, 35: 3519–3525.
- Glaser, B. 2007. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 362: 187–196.
- 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. 1998. Black carbon in soils: the use of benzenecarboxylic acids as specific markers. *Organic Geochemistry*, 29:811–819.

- 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 the tropics with charcoal: A review. *Biology and Fertility of Soils*, 35, 219-230.
- Goldberg, E.D. 1985. *Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution*. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons: New York. 198 p.
- Griffin J.J.; Goldberg E.D. 1983 Impact of fossil fuel combustion on the sediments of Lake Michigan: A reprise. *Environmental Science & Technology*, 17: 244–245.
- Haberstro, H.P.R.; Brandes, J.A.; Gelina, S.Y.; Dickens, A.F.; Wirick, S.; Cody, G. 2006. Chemical composition of the graphitic black carbon fraction in riverine and marine sediments at submicron scales using carbon X-ray spectromicroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 1483–1494.
- Hammes, K.; Schmidt, M. W. I.; Smernik, R. J.; Currie, L. A.; Ball, W. P.; Nguyen, T. H.; Louchouart, P.; Houel, S.; Gustafsson, O.; Elmquist, M.; Cornelissen, G.; Skjemstad, J. O.; Masiello, C. A.; Song, J.; Peng, P.; Mitra, S.; Dunn, J. C.; Hatcher, P. G.; Hockaday, W. C.; Smith, D. M.; Hartkopf-Froeder, C.; Böhmer, A.; Luer, B.; Huebert, B. J.; Amelung, W.; Brodowski, S.; Huang, L.; Zhang, W.; Gschwend, P.M.; Flores Cervantes, D.X.; Largeau, C.; Rouzaud, J.N.; Rumpel, C.; Guggenberger, G.; Kaiser, K.; Rodionov, A.; Gonzalez Vila, F.J.; Gonzalez Perez, J.A.; La Rosa, J.M.; Manning, D.A.C.; López Capél, E.; Ding, L. 2007. Comparison of quantification methods to measure fire-derived (black/elemental) carbon in soils and sediments using reference materials from soil, water, sediment and the atmosphere. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 21, p. 1-8.
- Herring, J. R. Charcoal fluxes into sediments of the North Pacific ocean: the Cenozoic record of burning. In: Sundquist, E. T.; Broecker, W. S. (Eds.) 1985. The Carbon Cycle and Atmospheric CO<sub>2</sub>: Natural Variations Archean to Present. *Geophysical Monograph Series*, 32, doi:10.1029/GM032. 627 p.
- Jantalia, C.P.; Resck, D.V.S.; Alves, B.J.R.; Zotarelli, L.; Urquiaga, S.; Boddey, R.M. 2007. Tillage effect on C stocks of a clayey Oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado region. *Soil & Tillage Research*, 95 (1): 97-109.
- Kang, M. 2002. *Quantification of soil organic carbon using mid- and near-drift spectroscopy*. Thesis. Office of Graduate Studies of Texas A&M University. August.
- Karhu, K.; Matilla, T.; Bergström, I.; Regina, K. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140: 309-313.
- Knicker, H.; Almendros, G.; Gonzalez-Vila, F.J.; Gonzales-Perez, J.A.; Polvillo, O. 2006. Characteristic alterations of quantity and quality of soil organic matter caused by forest fires in continental Mediterranean ecosystems: A solid-state <sup>13</sup>C NMR study. *European Journal of Soil Science*, 57: 558-569.
- Kurth, V. J.; Mackenzie, M. D.; DeLuca, T.H. 2006. Estimating charcoal content in forest mineral soils. *Geoderma*, 137: 135-139.
- Lehmann, J.; Gaunt, J.; Rondon, M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems-A review. *Mitig Adapt Strat Glob Change*, 11: 403-427.
- Lei, H.; Ren, S.; Julson, J. 2009. The effects of reaction temperature and time and particle size of corn stover on microwave pyrolysis. *Energy & Fuels*, 23: 3254-3261.
- Masiello, C.A. 2004. New directions in black carbon organic geochemistry. *Marine Chemistry*, 202: 201-21.
- Meniconi, M.F.G. 2007. *Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos no Ambiente: Diferenciação de fontes em sedimentos e metabólitos em bile de peixes*. Tese de

- Doutorado, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 213p.
- Mikuta, R.; Kleber, M.; Kaiser, K.; Jahn, R. 2005. Review: Organic matter removal from soils using hydrogen peroxide, sodium hypochlorite, and disodium peroxodisulfate. *Soil Science Society of America Journal*, 69: 120-135.
- Oguntunde, P.G.; Fosu, M.; Ajayi, A.E.; Giesen, N.V. 2004. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biology and Fertility of Soils*, 39: 295–299.
- Pérez, D.V.; Alcantara, S.; Arruda, R.J.; Meneghelli, N. A. 2001. Comparing two methods for soil carbon and nitrogen determination using selected Brazilian soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32 (<sup>1</sup>/<sub>2</sub>): 295-309.
- Pessenda, L.C.R.; Gouveia, S.E.M.; Aravena, R. 2001. Radiocarbon dating of total soil organic matter and humin fraction and its comparison with <sup>14</sup>C ages of fossil charcoal. *Radiocarbon*, 43: 595–601.
- Ponomarenko, E.V.; Anderson, D.W. 2001. Importance of charred organic matter in black Chernozem soils of Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 81: 285–297.
- Preston C.M.; Schmidt, M.W.I. 2006. Black (pyrogenic) carbon in boreal forests: a synthesis of current knowledge and uncertainties. *Biogeosciences*, 3: 211–271.
- Quaggio, J.A.; Raij, B.Van. 1979. Comparação de métodos rápidos para a determinação de matéria orgânica em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 3: 184-87.
- Rondon, M.A.; Lehmann, J.; Ramirez, J.; Hurtado, M. 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions. *Biology and Fertility of Soils*, 43: 699–708.
- Rumpel, C.; Alexis, M.; Chabbi, A.; Chaplot, V.; Rasse, D.P.; Valentin, C.; Mariotti, A. 2006. Black carbon contribution to soil organic matter composition in tropical sloping land under slash and burn agriculture. *Geoderma*, 130: 35-46.
- Rumpel, C.; Chaplot, V.; Chabbi, A.; Largeau, C.; Valentin, C. 2008. Stabilisation of HF soluble and HCL resistant organic matter in sloping tropical soils under slash and burn agriculture. *Geoderma*, 145: 347-354.
- Rumpel, C.; Chaplot, V.; Planchon, O.; Bernadou, J.; Valentin, C.; Mariotti A. 2006. Preferential erosion of black carbon contribution on steep slopes with slash and burn agriculture. *Catena*, 65: 30-40.
- Schmidt, M. W. I.; Noack, A. G. 2000. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges (review). *Global Biogeochemical Cycles*, 14: 77-79.
- Schmidt, M.W.I. Skjemstad, J.O.; Jager, C. 2002. Carbon isotope geochemistry and nanomorphology of soil black carbon: Black chernozemic soils in central Europe originate from ancient biomass burning. *Global Biogeochemistry*, 16: 1123.
- Schmidt, M.W.I.; Skjemstad, J.O.; Czimczink, C.I.; Glaser, B.; Prentice, K.M.; Gelinás, Y.; Kulbeusch, T.A. 2001. Comparative analysis of black carbon in soil. *Global Biogeochemical Cycles*, 15: 163-167.
- Schmidt, M.W.J.; Skjemstad, E.; Gehrt, E.; Köel-Knabner, I. 1999. Charred organic carbon in German chernozemic soils. *European Journal of Soil Science*, 50: 351-365.
- Schumacher, B.A. 2002. *Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments* (internet). United States Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, Las Vegas, U.S.A. (<http://www.epa.gov/esd/cmb/research/papers/bs116.pdf>). Acesso em 10/11/2012.



- Simpson, M. J.; Hatcher, P. G. 2004. Determination of black carbon in natural organic matter by chemical oxidation and solid-state  $^{13}\text{C}$  nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Organic Geochemistry*, 35: 923-935.
- Skjemstad, J.O.; Janik, L.J.; Spouncer, L.R. 1999b. *The nature, distribution, and impact of charcoal in soils*. Ninth Annual V. M. Goldschmidt Conference, August 22-27, 1999, Cambridge, Massachusetts, abstract no. 7369
- Skjemstad, J.O.; Reicosky, D.C.; Wilts, A.R.; McGowan, J.A. 2002. Charcoal carbon in U.S. agricultural soils. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1249-55.
- Skjemstad, J.O.; Taylor, J.A.; Smernik, R.J.; 1999a. Estimation of charcoal (char) in soils. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 30: 2283-2298.
- Sleutel, S.; Neve, S.; Singier, B.; Hofman, G. 2007. Quantification of organic carbon in soils: A comparison of methodologies and assessment of the carbon content of organic matter. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38: 2647-2657.
- Statsoft. 2008 *Electronic Statistics Program*. Tulsa: StatSoft, 1 CD-ROM.
- Stocks, B. J; Kauffman, J. B. 1997. Biomass consumption and behavior to wildland fires in boreal, temperate, and tropical ecosystems: parameters necessary to interpret historic fire regimes and future fire scenarios. In: Clark, J. S; Cachier, H.; Goldammer, J. G.; Stocks, B. (Eds.). *Sediment records of biomass burning and global change*. NATO ASI Series. Series I, *Global Environmental Change*, 51: 169-88.
- Thomasson, A.J. 1978. Towards an objective classification of soil structure. *Journal of Soil Science*, 29; 38-46.
- Van Zwieten, L.; Kimber, S.; Morris, S.; Chan, K. Y.; Downie, A.; Rust, J.; Joseph, S.; Cowie, A. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil*, 327: 235-246.
- Warnock, D.D.; Lehmann, J.; Kuyper, T. W.; Rilling, M. C. 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms. *Plant Soil*, 300: 9-20.
- WHITE, K.E. 2005. *Bioavailability of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Aquatic Environment*. North Carolina. Tese de Doutorado em Toxicologia, Department of Toxicology, North Carolina State University. 205 p.
- WOLFF, G.T.; KLIMISCH, R.L. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. Disponível em: <[www.ipccgip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html](http://www.ipccgip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html)>. Acesso em: 13 de set. de 2012.

**Tabela 4.** Teores de carbono preto em diferentes solos mundiais.

Localização	Característica do solo	Profundidade	C-teor	C-preto %	Método	Autores e ano
Amazônia Brasileira	Latossolo Argissolo	0-5 cm 90-100 cm	0,40-0,98 g kg <sup>-1</sup>	6-26 % Ctotal	Digestão por H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e HNO <sub>3</sub>	Dargie (2010)
Vale Missoula, Montana, USA,	Argissolo	60-120 cm	91±0,32-9,17±0,4 g kg <sup>-1</sup>	--- ---	Digestão por H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e HNO <sub>3</sub>	Kurth <i>et al.</i> (2006)
Alemanha	Chernozêmico	A horizonte	0,4-7,6 g kg <sup>-1</sup>	0+ 45% Ctotal	Oxidação por NaClO	Schmidt <i>et al.</i> (1999)
Canadá	Chernozêmico	A horizonte	---	--- 60% Ctotal	Microscopia eletrônica de varredura	Ponomarenko e Anderson (1999)
Texas	Chernozêmico	0-10 cm	---	--- -35% Ctotal	Microscopia eletrônica de varredura	Schmidt <i>et al.</i> (2002)
Austrália	-----	0-20 cm	13,6 g kg <sup>-1</sup>	10 -35% Ctotal	Microscopia eletrônica de varredura	Skjemstad <i>et al.</i> (2002)
Canadá	Chernozêmico	0-20 cm	---	--- 4-17% Ctotal	Marcador molecular (BPCA)	Glaser e Amelung (2003)
Sibéria	Podzólico	-----	---	--- 7-8% Ctotal	Marcador molecular (BPCA)	Czimec <i>et al.</i> (2003)
Província de Luang, norte do Laos	Luvissolo, Cambissolo	A horizonte B horizonte	---	5- 7% Ctotal 2- 4% Ctotal	Oxidação química	Rumpel <i>et al.</i> (2006)

Uma linha tracejada (-----) indica que a informação não estava disponível ou apresentado no artigo.

**Fonte:** Adaptado de Dargie, 2010.

**Tabela 5.** Áreas de capoeiras, florestas e pastos estudados.

Núcleos	Uso atual	Solos	Histórico	Frequência de fogo	idade
A Icântara	Floresta primária/ Madura	Latossolo amarelo	Exploração seletiva de Madeira	Não queimado	00
A Icântara	Capoeira baixa	Latossolo amarelo	Pasto	Queimado	
A Icântara	Capoeira média	Latossolo amarelo	Pasto	Queimado	5
A Icântara	Pasto extensivo	Latossolo amarelo	Pasto	Queimado	
S ão Luís	Capoeira média	Argissolo Vermelho- amarelo distrófico arênico	Agricultura itinerante de derruba e queima	Muitas vezes queimado	5
S ão Luís	Capoeira alta	Argissolo Vermelho- amarelo distrófico arênico	Agricultura itinerante de derruba-e- queima	Muitas vezes queimado	5
S ão Luís	Capoeira média	Argissolo Vermelho- amarelo distrófico arênico	Agricultura itinerante de derruba-e- queima	Muitas vezes queimado	5
S ão Luís	Capoeira baixa	Argissolo Vermelho- amarelo distrófico arênico	Agricultura itinerante de derruba-e- queima	Muitas vezes queimado	
G urupi	Capoeira baixa	Latossolo vermelho	Exploração intensiva de Madeira	Queimado	2
G urupi	Capoeira baixa	Latossolo vermelho	Exploração intensiva de Madeira	Queimado	
G urupi	Floresta primária/ Madura	Latossolo vermelho	Exploração seletiva de Madeira	Não queimado	00
G urupi	Floresta primária/ Madura	Latossolo vermelho	Exploração seletiva de Madeira	Não queimado	00
G urupi	Floresta primária/ Madura	Latossolo vermelho	Exploração seletiva de Madeira	Não queimado	00
T omé-Açu	Floresta primária/ Madura	Latossolo amarelo distrófico	Sem intervenção	Não queimado	00
T omé-Açu	Capoeira alta	Latossolo amarelo distrófico	Pasto	Queimado	6
T omé-Açu	Capoeira média	Latossolo amarelo distrófico	Pasto	Queimado	2

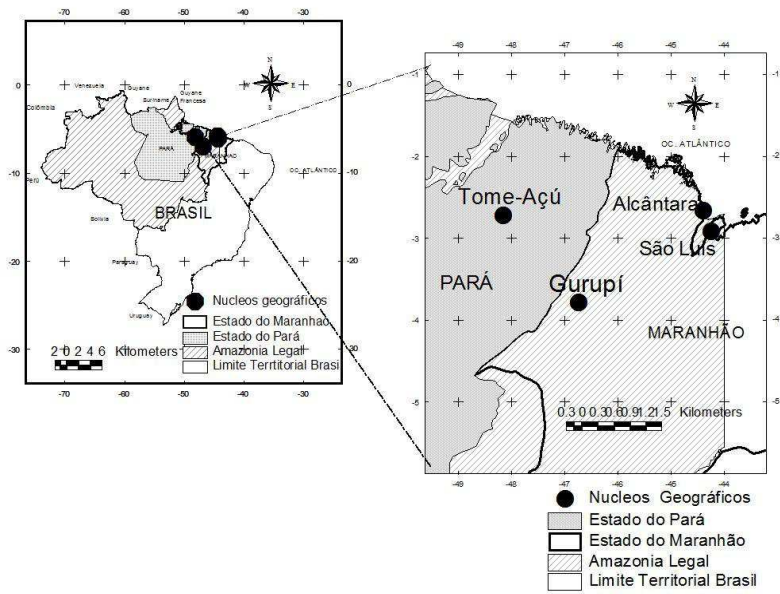


Figura 1. Núcleos de estudo.

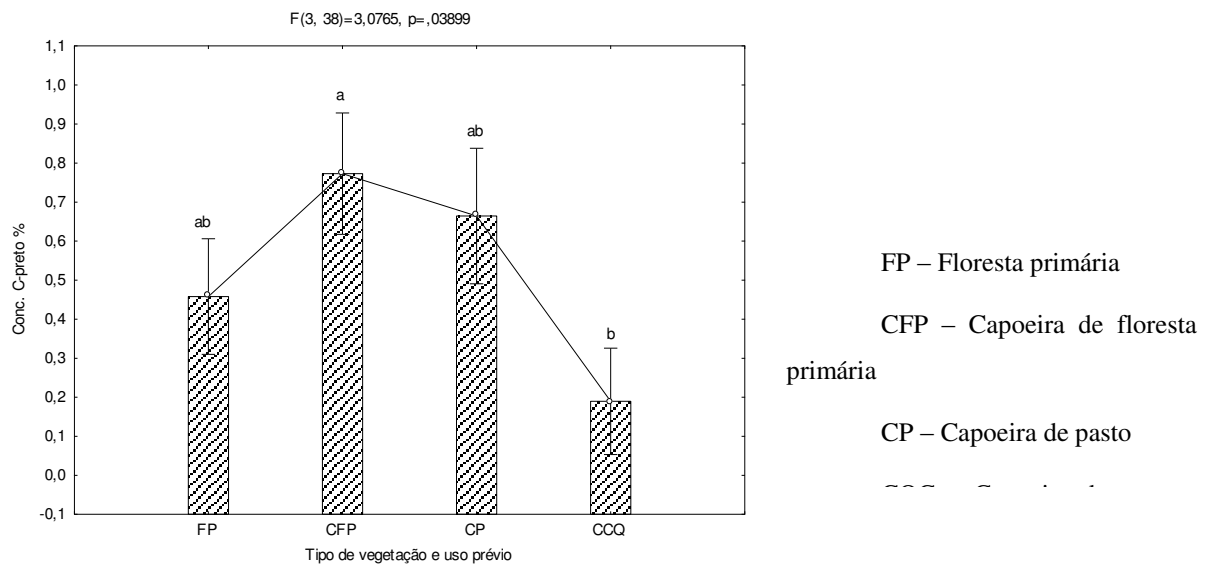
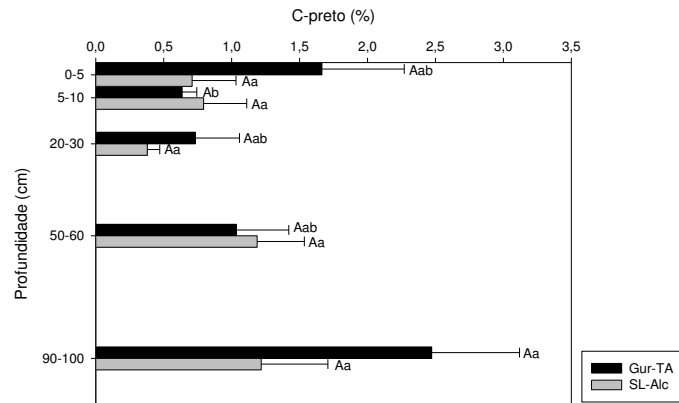
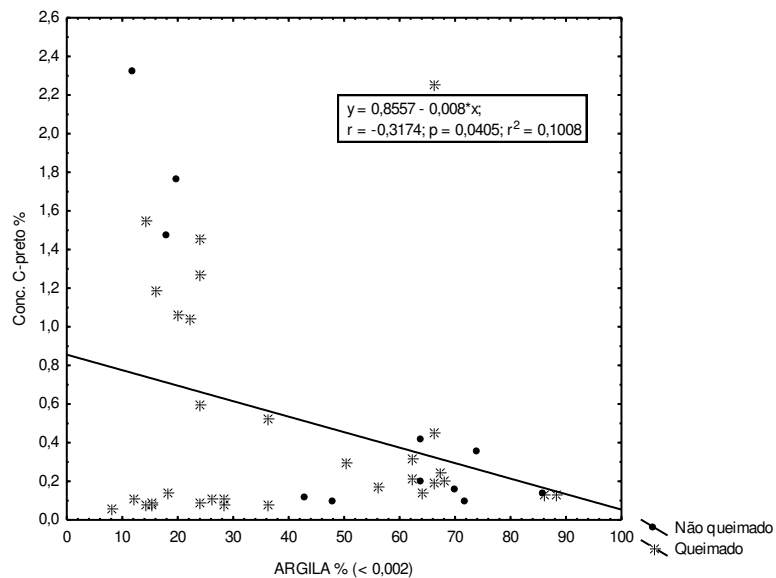


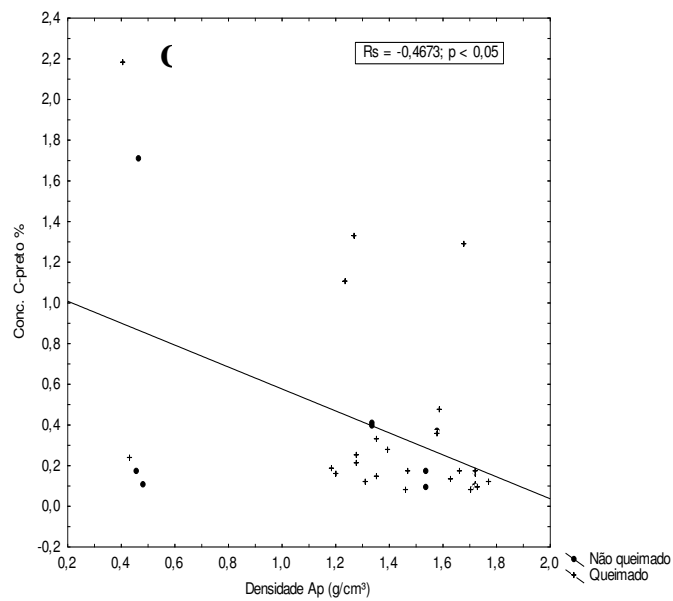
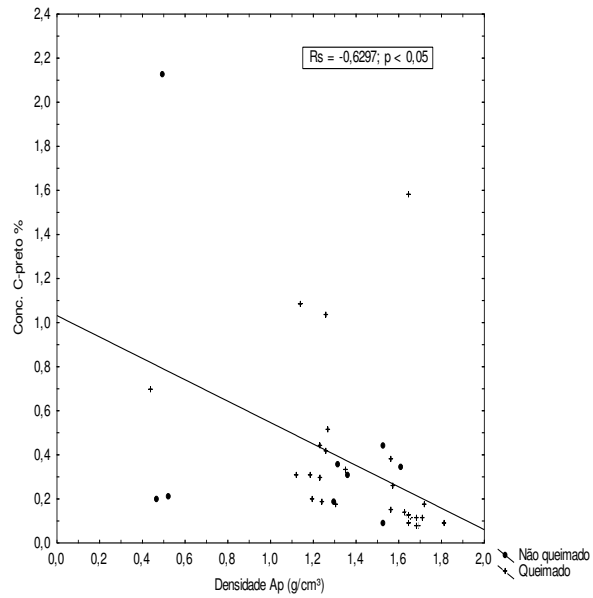
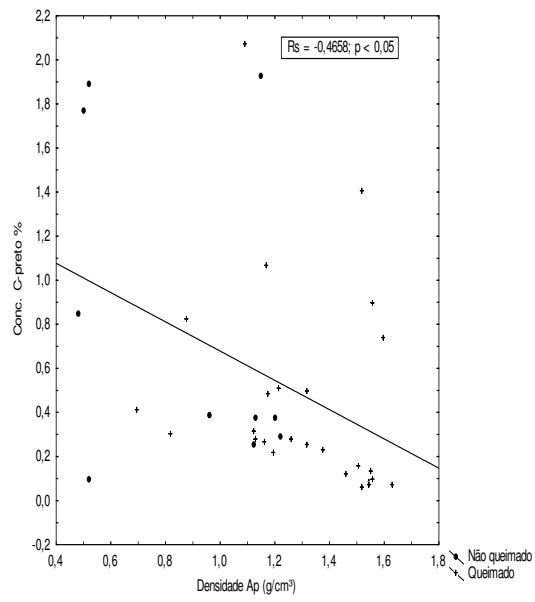
Figura 2. Efeito da vegetação e uso prévio na concentração de carbono preto na primeira camada do solo (0-5 cm) amostrada ao nível de 5% de probabilidade.



**Figura 3.** Concentrações de carbono preto entre os núcleos agrupados e nas diferentes profundidades dos solos amostrados. Para cada profundidade, médias dos núcleos seguidas pelas mesmas letras maiúsculas não diferem entre si. Para cada núcleo, médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem significativamente entre as profundidades, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.



**Figura 4.** Relação entre concentração de carbono preto e teor de argila na profundidade entre 50-60 cm no solo.



**Figura 5.** Carbono preto e densidade aparente do solo em diferentes profundidades. Em 5A, observa-se a relação a profundidade entre 5-10 cm, em 5B a relação na profundidade entre 20-30 cm e em 5C a relação na profundidade entre 90-100 cm.