

# Determinação dos Estoques de Carbono das Substâncias Húmicas e Vulnerabilidade às Emissões em Solos Arqueológicos e Não Arqueológicos da Amazônia Central

## Determination of Carbon Stocks of Humic Substances and Vulnerability to Emissions in Archaeological and Non-Archaeological Soils of the Central Amazon

Ricardo Soares,<sup>a,b,c,\*</sup> David V. B. Campos<sup>d</sup> Beata E. Madari,<sup>e</sup> Pedro Luiz O. A. Machado,<sup>e</sup> John E. L. Maddock,<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Avenida Venezuela, 110; CEP 20081-312, Saúde, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

<sup>b</sup>Universidade Veiga de Almeida (UVA). Rua Ibituruna, 108, Campus Tijuca, Maracanã, CEP 20271-020, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

<sup>c</sup>Universidade Federal Fluminense (UFF). Outeiro de São João Batista s/n°, Campus do Valonguinho, CEP 24020-150, Centro, Niterói – RJ, Brasil.

<sup>d</sup>Embrapa Solos. Rua Jardim Botânico 1024, CEP 22460-000, Jardim Botânico, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

<sup>e</sup>Embrapa Arroz e Feijão. Rodovia GO-462, km 12, Fazenda Capivara, Zona Rural, Caixa Postal 179 CEP 75375-000, Santo Antônio de Goiás – GO, Brasil.

\*E-mail: [ricardos@inea.rj.gov.br](mailto:ricardos@inea.rj.gov.br)

Recebido em: 31 de Março de 2021

Aceito em: 12 de Agosto de 2021

Publicado online: 12 de Agosto de 2022

The Amazon Region has archaeological soils called Amazonian Dark Earths (*Terras Pretas de Índio*) which are very efficient in retaining a large amount of highly stable organic matter when compared to typical non-archaeological soils in the region. The objective of this study was to determine the distribution, in-depth, of the carbon concentrations and stocks contained in Humic Acids, Fulvic Acids, and Humine from Amazonian Dark Earths and Acrisols typical of Central Amazonia under secondary forests with a different fallow. The chemical fractionation of humic substances was performed using the method of sequential extraction by the difference in solubility. The Amazonian Dark Earths areas showed higher concentrations of total carbon but behaved differently to non-archaeological soils. There carbon stock's  $C_{FA}$  fraction was a predominance for the P01 soil and  $C_H$  fraction for the P02 soil, while for the non-archaeological soils, the carbon stock's  $C_{HA}$  fraction was predominant (100%). The relationships commonly used in studies on the distribution of humic substances ( $C_{HA}/C_{FA}$  and  $C_{AE}/C_H$ ) are not appropriate for evaluating the stabilization mechanisms of organic matter in the Amazonian Dark Earths.

**Keywords:** Amazonian Dark Earth; humic substances; organic soil matter; global climate change.

## 1. Introdução

A demanda cada vez mais maior por alimentos para atender a necessidade da população mundial, que cresce em um ritmo acelerado e com sofisticação tecnológica jamais visto na história da Humanidade, tem requerido um significativo aumento da área cultivada e na produtividade agropecuária ao redor do mundo.<sup>1,2</sup> Desde a chamada “Revolução Verde” as atividades agrícolas vem recorrendo cada vez mais à inovação tecnológica para o aumento da produção com o uso massivo de fertilizantes sintéticos; seleção de sementes geneticamente melhoradas, assim como o aumento da mecanização agrícola, que apresentam altos custos econômicos e, se manejados inadequadamente, podem acarretar na degradação das qualidades químicas, físicas e biológicas do solo, trazendo significativos impactos ambientais negativos à segurança alimentar da população mundial.<sup>1,2</sup> Além disso, e coincidentemente, desde o início do período histórico informalmente reconhecido como a Grande Aceleração,<sup>1,3</sup> após a década de 1950, a Região Amazônica brasileira já perdeu mais de 50 milhões de hectares de florestas que foram convertidas em extensas áreas com atividades agrossilvopastoris.<sup>4-6</sup> Este fato por si só é extremamente marcante, pois o desmatamento e a mudança do uso da terra (DMUT) proporcionam profundos impactos ambientais negativos na capacidade de estocagem do carbono presente na Matéria Orgânica do Solo (MOS) e, conseqüentemente, influenciam diretamente no aumento das concentrações de Gases de Efeito Estufa (GEE) emitidos que influenciam profundamente o equilíbrio homeostático da atmosfera do Sistema Terra.<sup>4,6</sup>

Os solos agrícolas amazônicos típicos (Latossolos e Argissolos) costumam ser predominantemente ácidos, com baixa Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e, conseqüentemente, possuem baixa fertilidade e reduzido potencial de produção agrícola,<sup>7,8</sup> o que os tornam altamente vulneráveis à significativa perda de produtividade, caso sejam mal manejados ou sofram os impactos típicos do DMUT. Todavia, na Região Amazônica existem, também, solos arqueológicos chamados Terras Pretas de Índio (TPI) que possuem alta fertilidade, horizontes superficiais escuros e altas concentrações de Ca, P, Mn, Mg, Zn, assim como elevada estabilidade da MOS

quando comparados com os solos não arqueológicos (SNA) adjacentes e/ou típicos da Bacia Amazônica.<sup>9-19</sup> Nesse contexto, o entendimento da dinâmica da MOS possui um papel decisivo nas avaliações sociais, econômicas e ambientais que subsidiam a adoção de práticas agrícolas modernas mais racionais e efetivas que proporcionem ganho em escala econômica, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações.<sup>9</sup>

Embora a MOS raramente exceda 8% da composição mássica dos solos minerais, em algumas exceções emblemáticas (TPIs e Organosolos) podem chegar à 20% da distribuição.<sup>7,8</sup> Geralmente, a maior parte da MOS é formada pela transformação bioquímica dos restos vegetais (serrapilheira/liteira) e animais que são convertidos em Substâncias Húmicas (SH), que por sua vez são subdivididas em: Ácidos Fúlvicos (AF), Ácidos Húmicos (AH) e Humina (H).<sup>20-24</sup> As SHs participam de muitos processos pedogênicos, ambientais e geoquímicos, podendo servir como reservatório de micronutrientes, auxiliar na manutenção e retenção da água, dissolução de minerais, tamponamento do pH e contribuir significativamente na estrutura dos solos.<sup>22,23</sup> Além disso, as SHs referem-se a uma categoria de materiais de ocorrência natural, encontradas ou extraídas dos solos, sedimentos e águas; e são formadas por reações de policondensação e síntese, com altas massas moleculares e coloração escura.<sup>20-23</sup>

As SHs podem ser encontradas em todos os ecossistemas terrestres e aquáticos, constituindo-se em uma das mais abundantes formas de MOS na superfície do planeta.<sup>20,21</sup> Estima-se que entre 65 e 80% da matéria orgânica dos solos minerais seja composta por SHs.<sup>7</sup> Contudo, devido a uma falta de consenso sobre a natureza química das SHs, são definidas operacionalmente em termos dos métodos de extração e fracionamento químico,<sup>21,22</sup> proporcionando o entendimento da: pedogênese, melhoria das propriedades físicas do solo, interações organo-minerais, diminuição da fixação de fósforo e do impacto ambiental da agricultura sobre a qualidade do solo.<sup>19,20</sup> Contudo, ainda são escassos os estudos que demonstrem a distribuição das SHs em TPIs e SNAs da Região Amazônica.<sup>21-25</sup>

A MOS tem um enorme potencial de agir como um efetivo dreno de carbono e nitrogênio atmosféricos, com isso agindo com efeito próprio de *feedback* negativo proporcionando a diminuição das concentrações de GEEs antropogênicos, um fenômeno de preocupação global. O sequestro de carbono e nitrogênio em ecossistemas naturais apresenta-se como importante fator mitigador das mudanças climáticas globais, pois as alternativas de conversão de floresta em lavouras e pastagens (DMUT) acarretam na diminuição significativa da capacidade de estocagem de C e N no solo.<sup>26</sup> Logo, são desenvolvidas mundialmente pesquisas que proponham a adoção de métodos alternativos inovadores, que sejam o mais conservacionistas possíveis, como por exemplo, a adoção do plantio direto em detrimento ao plantio convencional, a adoção de sistemas agroflorestais (SAFs), sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta

(ILPF),<sup>27</sup> assim como o pousio para regeneração de áreas cultivadas para que com o intermédio da sucessão vegetal secundária possam voltar a se tornarem florestas novamente, mesmo que não sejam mais primárias.<sup>12,13</sup>

Mediante tudo o que foi exposto anteriormente, esse estudo teve como objetivos: (i) determinar a distribuição e os estoques de carbono entre as substâncias húmicas constituintes da matéria orgânica em “Terras Pretas de Índio” e Solos Não Arqueológicos (Argissolos) sob florestas secundárias no estado do Amazonas (AM); (ii) avaliar o efeito do tempo de pousio entre as duas áreas de Terras Pretas de Índio sobre o grau de humificação da matéria orgânica do solo; (iii) avaliar o potencial uso das relações AH/AF e EA/H como indicadores das alterações na qualidade da matéria orgânica em solos sob florestas secundárias da Região Amazônica.

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Descrição das áreas de estudo

Conforme observado na Tabela 1, foram selecionadas áreas de TPIs e SNAs distribuídas entre os municípios de Rio Preto da Eva, Humaitá, Novo Aripuanã e Apuí, todos pertencentes ao estado do Amazonas, Brasil. Essas áreas foram completamente descritas pedologicamente com ênfase nas características químicas e físicas por Soares *et al.*,<sup>12,13</sup> sendo que as áreas de TPI (P01 e P02) estão situadas em solos sob florestas secundárias cujas idades de pousio contabilizam 10 e 20 anos, respectivamente. Além disso, as demais áreas SNAs (P03, P04 e P05) estão situadas em Argissolos sob florestas secundárias, sem que haja registro cronológico dos respectivos tempos de pousios.<sup>12,13</sup>

**Tabela 1.** Localização georreferenciada das áreas sob florestas secundárias avaliadas

Perfil	Município	Coordenadas	
P01	Rio Preto da Eva	S 2°40'51,80"	O 59°43'15,70"
P02	Rio Preto da Eva	S 2°40'52,37"	O 59°43'16,48"
P03	Humaitá	S 7°52'50,60"	O 63°14'57,40"
P04	Novo Aripuanã	S 5°13'27,10"	O 60°14'02,00"
P05	Apuí	S 6°52'38,80"	O 59°13'31,80"

A vegetação característica dessa região é a Floresta Tropical Densa, constituída por árvores adensadas e multiestratificadas com 20 a 50 m de altura, com clima úmido, elevadas temperaturas e alta precipitação. Além disso, essas áreas estão inseridas no domínio climático tropical quente e úmido, Am (chuvas do tipo monção) segundo classificação de Köppen, caracterizado por apresentar um período seco de curta duração, com precipitações pluviais entre 2.250 e 2.750 mm, temperaturas médias anuais variando entre 25 e 27 °C e umidade relativa do ar entre 85 e 90%, conforme apresentado por Soares *et al.*<sup>12,13</sup>

## 2.2. Coleta e tratamento das amostras

Para a coleta de amostras foram abertas quatro trincheiras nestas áreas de estudo (P01 a P05). Sendo que nas duas áreas de TPIs (P01 e P02) foram coletadas amostras em sete camadas estratigráficas costumeiramente usadas em estudos de fracionamento químico da MOS (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm). Em relação aos demais SNAs (P03, P04 e P05) preferiu-se utilizar os horizontes pedológicos naturais para que possam contribuir como áreas-controle para futuros estudos que desejem avaliar a dinâmica da MOS em solos da Amazônia central e sob florestas secundárias com diferentes períodos de posio.

Posteriormente, as amostras de solo foram secas em estufa com circulação de ar forçada, a temperatura de 40 °C, destorroadas, tamisadas em peneira de 2,0 mm; recolhendo-se as frações dos solos não retidas na peneira, constituindo-se assim terra fina seca ao ar (TFSA).<sup>28</sup>

## 2.3. Determinação da densidade do solo

Foram determinadas as densidades dos solos ( $\rho$ ) em todas as amostras utilizando-se anéis de Kopecky com volumes totais de aproximadamente 50 cm<sup>3</sup>, e transferindo-se para sacos plásticos vedados.<sup>28</sup> Secaram-se as amostras em estufa a 105 °C, por 48 horas, pesaram-se e fizeram-se as determinações usando-se a equação 1:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

onde:  $\rho$  = Densidade da amostra (kg m<sup>-3</sup>); M = Massa da amostra (kg); V = Volume do anel de Kopecky (m<sup>3</sup>).

## 2.4. Fracionamento químico da matéria orgânica do solo

A extração e o fracionamento químico quantitativo das SHs foram realizados em todas as amostras de TFSA, em triplicata, no Laboratório de Análise de Água, Solo e Planta da Embrapa Solos, conforme descrito pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (SISH),<sup>29</sup> podendo ser encontrado o roteiro completo (<http://www.ihss.gatech.edu/>), com as devidas modificações propostas para solos de clima tropical por Benites *et al.*<sup>21</sup> O método de extração baseia-se na solubilidade diferencial das SHs em meios alcalinos e ácidos, sendo obtidas as frações: Ácidos Fúlvicos (AF), Ácidos Húmicos (AH) e Humina (H).

Pesaram-se 0,25 g de todas as amostras de TFSA; transferiu-se para tubo de centrifuga de 50 mL com tampa e adicionou-se 20 mL de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; agitou-se manualmente e deixou-se em repouso por 24 horas; centrifugou-se a 5.000 g por 30 minutos em uma centrífuga refrigerada da marca International Equipment Company e modelo B-22M. Recolheu-se cuidadosamente o sobrenadante em copo plástico descartável de 50 mL e reservou-se; adicionou-se mais 20 mL de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> a cada amostra e agitou-se manualmente até o desprendimento

e ressuspensão do precipitado; deixou-se em repouso por 1 hora; centrifugou-se novamente a 5.000 g por 30 minutos; recolheu-se o sobrenadante junto ao previamente reservado (extrato alcalino, pH = 13,0); separou-se o precipitado (H). Ajustou-se o pH do extrato alcalino para pH = 1,0; decantou-se por 18 horas; filtrou-se o precipitado em filtro de membrana de 0,45 mm sob vácuo; recolheu-se o filtrado e aferiu-se o volume para 50 mL usando H<sub>2</sub>O destilada (AF); adicionou-se NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> sobre o precipitado até a lavagem completa do filtro e aferiu-se o volume para 50 mL usando H<sub>2</sub>O destilada (AH).

## 2.5. Determinação de carbono nas substâncias húmicas (Método Yeomans-Bremner)

Uma vez extraídas as substâncias húmicas (AF, AH e H) de todas as amostras, procedeu-se a determinação dos teores de carbono presente em cada uma das frações químicas, assim como na TFSA inteira, utilizando-se a metodologia de oxidação do carbono com dicromato de potássio e titulação do excesso com sulfato ferroso amoniacal, como proposto por Yeomans-Bremner, por ser a metodologia recomendada pela SISH,<sup>21,29</sup> totalizando 312 determinações de carbono. A técnica encontra-se descrita a seguir.

### 2.5.1. Determinação de carbono em Ácidos Fúlvicos e Ácidos Húmicos

Para cada fração extraída de SHs, transferiu-se uma alíquota de 5,00 mL da solução de AF ou AH para tubos de digestão, utilizando-se uma pipeta automática da marca Mettler-Toledo; adicionou-se 1,00 mL de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 0,042 mol L<sup>-1</sup> e 5 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado da marca Merck a cada amostra, e em quatro tubos contendo 5 mL de H<sub>2</sub>O destilada (brancos). Posteriormente, levou-se os tubos com as amostras e dois dos quatro brancos ao bloco digestor pré-aquecido a 150 °C e deixou-se por 30 minutos dentro de capela com exaustão; transferiu-se quantitativamente o conteúdo dos tubos de digestão para erlenmeyers de 125 mL (amostras + dois brancos aquecidos + dois brancos sem aquecimento); adicionou-se 3 gotas de indicador Ferroin; titulou-se com sal de Mohr 0,0125 mol L<sup>-1</sup> sob agitação, conforme a equação 2.

$$C = (V_{\text{baq}} - V_{\text{am}}) N_{\text{sal de Mohr corrigido}} \times 12/4 \times 50/\text{alíquota (mL)} \times 1/\text{peso da amostra (g)} \quad (2)$$

onde, C = Concentração de carbono em Ácido Fúlvico ou Ácido Húmico (g kg<sup>-1</sup>); V<sub>baq</sub> = Volume de sal de Mohr na titulação do branco aquecido (mL); V<sub>am</sub> = Volume de sal de Mohr na titulação da amostra (mL); N<sub>sal de Mohr corrigido</sub> = Normalidade do sal de Mohr corrigida pela equação 3:

$$N_{\text{sal de Mohr corrigido}} = \frac{\text{Volume K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \times \text{Normalidade K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{\text{Volume sal de Mohr na titulação do branco sem aquecer}} \quad (3)$$

### 2.5.2. Determinação de carbono em Humina

Para cada fração extraída de H (ou de TFSA inteira),

transferiu-se quantitativamente, o precipitado dos tubos de centrifuga de 50 mL para tubos de digestão, secou-se completamente em estufa aquecida a 65 °C; adicionou-se 5,00 mL de  $K_2Cr_2O_7$  0,1667 mol L<sup>-1</sup> e 10 mL de  $H_2SO_4$  concentrado da marca Merck a cada amostra e em quatro tubos vazios (brancos). Posteriormente, levou-se os tubos com as amostras e dois dos quatro brancos ao bloco digestor pré-aquecido a 150 °C, deixou-se por 30 minutos, sob exaustão; transferiu-se quantitativamente o conteúdo dos tubos de digestão para erlenmeyers de 125 mL (amostras + dois brancos aquecidos + dois brancos sem aquecimento); adicionou-se 3 gotas de indicador Ferroin; titulou-se o excesso com  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$  (sal de Mohr) 0,2500 mol L<sup>-1</sup> sob agitação e calculou-se conforme a equação 4:

$$C = (V_{baq} - V_{am}) N_{sal \text{ de Mohr corrigido}} \times 12/4 \times 1/\text{peso da amostra (g)} \quad (4)$$

onde, C = Concentração de carbono na Humina ou solo inteiro (g kg<sup>-1</sup>);  $V_{baq}$  = Volume de sal de Mohr na titulação do branco aquecido (mL);  $V_{am}$  = Volume de sal de Mohr na titulação da amostra (mL);  $N_{sal \text{ de Mohr corrigido}}$  = Normalidade do sal de Mohr corrigida pela equação 5:

$$N_{sal \text{ de Mohr corrigido}} = \frac{\text{Volume } K_2Cr_2O_7 \times \text{Normalidade } K_2Cr_2O_7}{\text{Volume sal de Mohr na titulação do branco sem aquecer}} \quad (5)$$

Após as devidas análises titrimétricas, obtiveram-se as concentrações absolutas de carbono (g kg<sup>-1</sup>) correspondente à cada fração de SH e na TFSA inteira. Ademais, tendo-se os valores dos teores de AH e AF, pode-se calcular a Relação AH/AF, pela fórmula proposta por Benites *et al.*,<sup>21</sup> conforme apresentado pela equação 6:

$$\text{Relação AH/AF} = \frac{AH}{AF} \quad (6)$$

onde, AH = Ácido Húmico (g kg<sup>-1</sup>); AF = Ácido Fúlvico (g kg<sup>-1</sup>).

Possuindo o teor de H, pôde-se obter a razão entre as frações solúveis no extrato alcalino (EA) e o resíduo,<sup>21</sup> conforme observado nas equações 7 e 8.

$$EA = AF + AH \quad (7)$$

onde, EA = Extrato Alcalino (g kg<sup>-1</sup>); AF = Ácido Fúlvico (g kg<sup>-1</sup>); AH = Ácido Húmico (g kg<sup>-1</sup>).

$$\text{Relação EA/H} = \frac{EA}{H} \quad (8)$$

onde, EA = Extrato Alcalino (g kg<sup>-1</sup>); H = Humina (g kg<sup>-1</sup>).

## 2.6. Determinação dos estoques de carbono nas substâncias húmicas

Os estoques de carbono (EC) nas amostras foram calculados multiplicando-se as respectivas concentrações de C presentes nas SHs em uma determinada camada pela sua densidade e espessura da camada.<sup>18</sup> Os ECs foram obtidos

conforme pode ser observado pela equação 9:

$$EC = \frac{C \cdot \rho \cdot e}{10} \quad (9)$$

onde: EC = Estoque de C acumulado na amostra (Mg ha<sup>-1</sup>); C = Concentração de C na amostra (g kg<sup>-1</sup>);  $\rho$  = Densidade do solo (kg m<sup>-3</sup>) e e = Espessura da camada de solo analisada (m).

## 2.7. Análises estatísticas dos resultados

O delineamento amostral foi inteiramente casualizado, mas apenas entre os solos P01 e P02, o que resultou em um esquema fatorial 2x4 (2 solos e 4 trincheiras). Para verificar diferenças significativas nas concentrações e estoques de carbono das substâncias húmicas e solos nas duas áreas de TPI, foram realizadas as análises de variâncias (ANOVA) e o teste de comparação entre médias Tukey (HSD).

As análises estatísticas foram realizadas pelo uso do software *Statistica 10.0* da *StatSoft*. Os resultados obtidos dos SNAs foram excluídos dos testes de médias e da análise de variância em função destes locais não comporem o desenho estatístico usado para avaliar o efeito da MOS em TPIs, desse modo as médias das concentrações e os estoques de carbono avaliados nas áreas de SNAs foram apresentadas somente com seus valores médios e respectivos desvios-padrão, possuindo apenas um caráter meramente informativo e para fins de áreas-controle sob vegetação secundária na Região Amazônica.

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1. Distribuição de carbono nas substâncias húmicas dos solos

As concentrações de carbono nas SHs das cinco diferentes áreas avaliadas podem ser consideradas como características da composição e estrutura das respectivas frações em relação ao material de origem (natural ou antrópico). Resumidamente, foi observado que as concentrações de carbono nas frações Ácidos Húmicos ( $C_{AH}$ ) foram predominantes nos SNAs, o mesmo não sendo observado nas TPIs que apresentaram o predomínio de carbono na fração Ácido Fúlvico ( $C_{AF}$ ) para o solo P01, e carbono na fração Humina ( $C_H$ ) para o solo P02, conforme pode ser observado na Tabela 2.

A área P02 apresentou concentrações de carbono superiores e estatisticamente significativas ( $p < 0,05$ ), em relação àquelas apresentadas pela área P01, somente para  $C_{AH}$  na camada mais superficial ( $[C] = 10,4 \text{ g kg}^{-1}$ ; 0-5 cm) e em 71% das camadas mais superficiais (0 a 60 cm), variando de 12,0 a 4,7 g kg<sup>-1</sup>. Ademais, a área P01 foi aquela em que apresentou o predomínio de  $C_{AF}$  (85%) quando comparadas com as demais SHs presentes nesse solo, o mesmo não sendo observado para a TPI P02 que apresentou o predomínio de

**Tabela 2.** Concentrações de carbono nas substâncias húmicas dos solos avaliados

Profundidade (cm)	$C_{AF}^a$	$C_{AH}^b$	$C_H^c$	$C_{TOTAL}$
	----- g kg <sup>-1</sup> -----			
P01 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico				
0 - 5	11,5±7,0a	5,3±2,5a	4,6±1,2a	22,5±5,7a
5 - 10	8,8±3,4a	6,5±3,0a	5,7±1,3a	19,3±1,3a
10 - 20	8,8±3,2a	9,6±3,0a	4,7±0,6a	19,5±2,0a
20 - 40	8,7±3,4a	8,4±2,4a	3,5±0,3a	19,4±6,6a
40 - 60	5,7±3,0a	3,2±1,0a	1,9±0,4a	13,8±5,8a
60 - 80	4,6±4,0a	1,1±0,6a	2,1±0,8a	13,6±8,0a
80 - 100	2,7±0,2a	0,4±0,2a	2,4±1,0a	5,7±2,2a
P02 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico				
0 - 5	11,6±5,6a	10,4± 2,0b	12,0±1,0b	37,1±5,3b
5 - 10	5,0±0,8a	5,0±0,7a	8,2±0,7b	20,6±2,9a
10 - 20	6,2±1,2a	5,4±0,7a	8,1±0,8b	20,7±2,8
20 - 40	4,1±0,5a	5,8±1,0a	6,8±0,4b	15,5±2,2a
40 - 60	3,5±1,5a	3,0±0,8a	4,7±0,5b	10,9±0,9a
60 - 80	1,8±0,6a	1,6±0,6a	2,7±0,4a	6,3±1,1a
80 - 100	1,5±0,3a	1,1±0,2a	2,0±0,3a	4,3±0,4a
P03 - Argissolo Amarelo Distrófico plúntico de textura média/argilosa				
0 - 23	2,3±0,2	6,3±0,2	3,2±0,2	12,9±0,5
23 - 38	1,9±0,3	3,7±0,4	3,2±0,3	9,6±0,3
38 - 50	1,3±0,5	3,5±0,3	2,0±0,5	7,4±0,3
50 - 77	0,7±0,4	3,6±0,4	1,5±0,4	6,4±0,2
77 - 110	0,7±0,2	3,2±0,5	1,2±0,4	5,5±0,3
110 - 200	0,7±0,2	2,1±0,2	0,7±0,3	3,3±0,4
P04 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico de textura média/argilosa				
0 - 30	2,8±0,3	6,7±0,4	3,9±1,2	14,0±0,5
30 - 50	1,4±0,3	6,0±0,4	3,2±0,2	10,0±0,4
50 - 96	0,8±0,1	2,4±0,6	1,6±0,5	4,7±0,2
96 - 140	0,9±0,1	2,4±0,4	1,1±0,1	4,2±0,2
140 - 200	0,8±0,2	1,6±0,6	1,1±0,3	3,5±0,2
P05 - Argissolo Amarelo Distrófico plúntico de textura média/argilosa				
0 - 30	2,8±0,3	6,7±0,4	3,9±1,2	14,0±0,5
30 - 50	1,4±0,3	6,0±0,4	3,2±0,2	10,0±0,4
50 - 96	0,8±0,1	2,4±0,6	1,6±0,5	4,7±0,2
96 - 140	0,9±0,1	2,4±0,4	1,1±0,1	4,2±0,2
140 - 200	0,8±0,2	1,6±0,6	1,1±0,3	3,5±0,2

<sup>a</sup> $C_{AF}$ : Carbono Ácido Fúlvico. <sup>b</sup> $C_{AH}$ : Carbono Ácido Húmico. <sup>c</sup> $C_H$ : Carbono Humina. Comparação entre as médias feitas pelo teste Tukey (HSD). Valores seguidos pela mesma letra numa mesma coluna não são significativamente diferentes pelo Teste F da análise de variância ( $p < 0,05$ ) e/ou ( $p < 0,01$ ).

$C_H$  ao longo de todo o perfil e variando de forma decrescente de 12,0 a 2,0 g kg<sup>-1</sup>. O predomínio de  $C_{AF}$  na área P01 está de acordo com resultados observados na literatura, os quais afirmam que, em condições tropicais, a rápida mineralização da MOS favorece a formação de substâncias húmicas menos complexas que, por sua vez, são mais solúveis e móveis ( $C_{AF}$  e  $C_{AH}$ ).<sup>22,23,25</sup>

Todavia, o predomínio do  $C_H$  na área P02 indica uma maior presença de MOS com grupamentos aromáticos e anéis

benzênicos, o que proporciona maior grau de polimerização e menor suscetibilidade ao ataque da microfauna do solo,<sup>30,31</sup> o que está de acordo com as evidências visuais de maior aporte de carvões nessa área,<sup>12,13</sup> e pela capacidade da Humina representar adequadamente o componente mais heterogêneo da MOS (resíduos vegetais em decomposição, componentes apolares, compostos organominerais, carvões etc.),<sup>22,23,30</sup> reforçando com isso que em TPIs os processos de humificação e a dinâmica do carbono no solo são diferentes

aos tipicamente apresentados por SNAs.<sup>22,23</sup> Por outro lado, os resultados apresentados pela TPI P02 permitem supor, também, que nesta área existe um sistema radicular mais denso da vegetação devido ao dobro do tempo de pouso (20 anos) e/ou que preserva melhor uma maior quantidade de carbono de origem pirogênica depositado pelas populações pré-Colombianas da região, o que proporcionou um aumento significativo na quantidade e na qualidade da MOS adicionada ao solo, com isso favorecendo ainda mais o incremento do teor de carbono das frações humificadas e refletindo em uma menor degradação ambiental.

As áreas com SNAs apresentaram baixos valores de SHs, variando de 0,7 g kg<sup>-1</sup> para C<sub>AF</sub> nos horizontes mais profundos (50-200 cm) da área P03 a 12,5 g kg<sup>-1</sup> na fração C<sub>AH</sub> da camada mais superficial (0-5 cm; P03) da área P04 (Tabela 2). Além disso, foi observado para os SNAs que as variações das concentrações de carbono das SHs foram mais abruptas em relação à profundidade, permanecendo as maiores concentrações nos horizontes mais superficiais (0-5 cm; P03) e decrescendo em quase 30% para o horizonte subsequente (5-10 cm; P03). Geralmente, no processo de humificação de SNAs típicos de clima tropical (Latosolos e Argissolos) os resíduos vegetais depositados na superfície do solo sofrem rápida mineralização, originando produtos pré-húmicos que migram facilmente em profundidade por lixiviação, porém uma parte destes produtos origina os AFs livres e outra parte sofre processos de polimerização e condensação, que formarão os AHs e as Hs.<sup>22,23,31,32</sup> A fração C<sub>AH</sub> representa o componente intermediário nos processos de estabilização das SHs, sendo, portanto, marcadores naturais do processo de humificação, assim como do uso e manejo do solo.<sup>33-36</sup>

Para Zech *et al.*,<sup>24</sup> o predomínio de AHs nos SNAs (P03, P04 e P05) contraria o que se observa, geralmente, em solos de terra firme e solos de várzea da Amazônia, onde se tem o C<sub>AF</sub> suplantando a fração C<sub>AH</sub> como resultado de fraca humificação, mas para Cunha *et al.*,<sup>22,23</sup> ao avaliarem dezenas de TPIs (sob cultivo e floresta), assim como SNAs típicos da Amazônia (Latosolos e Argissolos), observaram que a maior parte da MOS (> 43%) em horizontes superficiais (0-20 cm) estava contida na C<sub>H</sub>. Em parte, isso pode ser explicado por esses SNAs possuírem caráter distrófico com excessiva drenagem e estarem situados em localidade com condições bioclimáticas extremas (altas temperaturas e precipitações pluviométricas elevadas - Tabela 1),<sup>12,13</sup> o que poderia proporcionar uma alta taxa de lixiviação dos níveis de C<sub>AF</sub> ao longo dos perfis.<sup>22,23,34,35</sup>

Conforme pode ser observado na Tabela 2, todas as camadas apresentaram-se com concentrações de carbono total estatisticamente semelhantes ( $p < 0,01$ ), com exceção da camada mais superficial (0-5 cm) da área P02 que apresentou concentração total estatisticamente superior ( $p < 0,01$ ) em mais de 40% quando comparada com a mesma camada da área P01. As concentrações totais de carbono nas áreas P01 e P02 estiveram mais de 20% acima daquelas apresentadas para solos arenosos (Latosolo Vermelho Distrófico e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico) sob floresta

primária densa localizados no Parque Nacional Viruá, estado de Roraima.<sup>37</sup> Contudo, os SNAs (Argissolos P03, P04 e P05) apresentaram teores de carbono mais próximos de Neossolo Quartzarênico e Espodosolo Ferrihumilúvico sob *campinarana* nesse mesmo Parque situado em Roraima.<sup>37</sup> Ao que tudo indica pelas concentrações de carbono total nos SNAs, as condições de temperatura e pluviosidade vem acelerando de forma mais efetiva a decomposição da MOS,<sup>12,13</sup> que ao apresentarem alta drenagem proporcionam menor produção de biomassa nativa pela cobertura vegetal e ausência de carbono de origem pirogênica pelas populações pré-Colombianas.<sup>37</sup>

### 3.2. Relações C<sub>AH</sub>/C<sub>AF</sub> e EA/C<sub>H</sub> dos solos

A relação C<sub>AH</sub>/C<sub>AF</sub> serve como indicador de solubilidade e hidrofobicidade,<sup>37</sup> e foi utilizada por Kononova como atributo diagnóstico da qualidade das SHs,<sup>22,30,38</sup> pois como foi demonstrado por Soares *et al.*,<sup>10,11</sup> todos os solos do presente estudo apresentam um baixo conteúdo de bases trocáveis, o que pode diminuir a intensidade do processo de humificação, isto é, as reações de síntese e condensação química e microbiana.<sup>30,39</sup> Desta maneira, a composição e as inter-relações das SHs pode ser utilizada como um apropriado indicador dos efeitos do manejo (reflorestamento) sobre a qualidade do solo e expressar o grau de evolução do processo de humificação.<sup>22,23,34-36</sup> Geralmente, em solos de clima tropical a fração C<sub>H</sub> costuma predominar e a relação C<sub>AH</sub>/C<sub>AF</sub> costuma ser menor que 1,<sup>33-35</sup> pois apresentam uma menor intensidade dos processos de humificação (condensação e síntese), uma mais intensa mineralização dos resíduos vegetais, assim como restrições edáficas e baixas concentrações dos teores de bases trocáveis, o que acarreta uma grande restrição à atividade biológica em solos altamente intemperizados,<sup>30-32</sup> como é o caso de todos os solos avaliados nesse estudo.<sup>12,13</sup>

Nas TPIs, as relações C<sub>AH</sub>/C<sub>AF</sub> variaram de 0,2 a 1,4, sendo que só foi apresentada diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ) entre a camada mais profunda (80-100 cm), na qual a área P02 teve uma relação C<sub>AH</sub>/C<sub>AF</sub> 3,5 vezes superior à apresentada pela área P01. Além disso, foi observado nas TPIs um predomínio de relação C<sub>AH</sub>/C<sub>AF</sub> < 1,0 (64% dos casos avaliados), mas o mesmo não foi observado nos SNAs que apresentaram relações C<sub>AH</sub>/C<sub>AF</sub> que variaram entre 1,7 e 5,7 (Tabela 3). As altas relações C<sub>AH</sub>/C<sub>AF</sub> dos SNAs podem servir como indicativos de que nesses solos predominam vias de humificação (polimerização e condensação) devido às condições climáticas tropicais,<sup>37</sup> ou que ocorrem a neossíntese pela microbiota (humificação de moléculas simples por síntese microbiana) e/ou a insolubilização/humificação dos compostos fenólicos solúveis devido ao aporte de gás O<sub>2</sub> atmosférico quando esses solos foram arados para o cultivo agrícola no período anterior ao pouso.<sup>30</sup>

O uso da MOS como indicadora da qualidade ambiental está baseado na sua importante ação sobre a fertilidade dos

**Tabela 3.** Grau de humificação dos solos avaliados

Profundidade (cm)	$C_{AH}^a/C_{AF}^b$	$C_{EA}^c/C_H^d$
P01 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico		
0 - 5	0,6±0,4a	4,0±2,6a
5 - 10	0,9±0,7a	2,8±0,9a
10 - 20	1,3±1,1a	4,0±0,9a
20 - 40	1,2±1,1a	5,0±0,8a
40 - 60	0,8±0,6a	4,9±0,8a
60 - 80	0,4±0,3a	3,3±3,1a
80 - 100	0,2±0,1a	1,4±0,5a
P02 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico		
0 - 5	1,0±0,4a	1,3±0,1a
5 - 10	1,0±0,2a	1,2±0,1b
10 - 20	0,9±0,2a	1,4±0,3b
20 - 40	1,4±0,2a	1,5±0,2b
40 - 60	0,9±0,4a	1,4±0,4b
60 - 80	0,9±0,2a	1,3±0,5a
80 - 100	0,7±0,2b	1,4±0,4a
P03 - Argissolo Amarelo Distrófico plúntico de textura média/argilosa		
0 - 23	2,8±0,3	2,7±0,1
23 - 38	2,0±0,3	2,0±0,3
38 - 50	3,0±0,8	2,5±0,5
50 - 77	5,7±2,0	3,0±0,3
77 - 110	4,6±0,6	3,2±0,6
110 - 200	3,4±1,2	4,1±1,6
P04 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico de textura média/argilosa		
0 - 10	1,7±0,1	2,2±0,1
10 - 25	3,0±0,7	2,5±0,3
25 - 70	2,6±0,2	2,0±0,3
70 - 120	3,1±0,8	2,0±0,4
120 - 200	2,7±0,8	2,5±0,8
P05 - Argissolo Amarelo Distrófico plúntico de textura média/argilosa		
0 - 30	2,4±0,1	2,6±0,9
30 - 50	4,4±0,9	2,3±0,3
50 - 96	3,1±1,1	2,2±0,9
96 - 140	2,6±0,6	3,0±0,2
140 - 200	2,0±1,1	2,5±0,9

<sup>a</sup> $C_{AF}$ : Carbono Ácido Fúlvico. <sup>b</sup> $C_{AH}$ : Carbono Ácido Húmico. <sup>c</sup> $C_H$ : Carbono Humina. <sup>d</sup> $C_{EA}$ : Carbono Extrato Alcalino ( $C_{AF}+C_{AH}$ ). Comparação entre as médias feitas pelo teste Tukey (HSD). Valores seguidos pela mesma letra numa mesma coluna não são significativamente diferentes pelo Teste F da análise de variância ( $p < 0,05$ ) e/ou ( $p < 0,01$ ).

solos, pois afeta diretamente as propriedades químicas, físicas e biológicas, sendo que as SHs são marcadores químicos estáveis na história dos solos. Logo, a fração  $C_{AH}$  é considerada como um marcador natural do processo de humificação, podendo refletir condição de formação e manejo pretérito dos solos. Os solos naturalmente férteis em

ambientes temperados apresentam-se mais enriquecidos em  $C_{AH}$ , onde a relação  $C_{AH}/C_{AF} > 1$ . Por outro lado, nos trópicos, relações  $C_{AH}/C_{AF} < 1$  como os das TPIs aqui apresentados, são comumente reportados na literatura científica.<sup>22,23,33-35</sup> Em ambiente tropical, onde a presença de bases trocáveis nos solos é baixa, devido ao intemperismo a que estes foram submetidos, espera-se uma menor intensidade dos processos de humificação (condensação e síntese) e como consequência, menores teores de ácidos húmicos.<sup>34</sup> Contudo, Lima *et al.*,<sup>25</sup> encontraram uma relação  $C_{AH}/C_{AF} = 14$  em um horizonte A de um Cambissolo Antrópico (TPI) e  $C_{AH}/C_{AF} = 4$  em um Argissolo Antrópico (TPI), valores muito acima aos encontrados para as camadas/horizontes superficiais desse estudo (Tabela 3).

Embora tenham obtidos relações  $C_{AH}/C_{AF} < 1$  em 64% dos casos avaliados, as áreas P01 e P02 se comportaram tipicamente como TPIs sob floresta,<sup>22,23</sup> pois as relações  $C_{AH}/C_{AF}$  ao terem uma mesma tendência, evidenciaram que a não perturbação dos solos pelo cultivo, ou os respectivos longos pousios, desfavoreceram a oxidação de frações mais lábeis da MOS, resultando num equilíbrio dos teores das SHs de baixa massa molar em superfície, mantendo-se praticamente estável com a profundidade. Assim como observado por Cunha *et al.*,<sup>22,23</sup> e Madari *et al.*,<sup>7</sup> a relação  $C_{AH}/C_{AF}$  não parece ser um atributo diagnóstico relevante da qualidade das SHs e nem tampouco da qualidade dos solos TPIs, pois nesses solos a formação das SHs com suas propriedades físico-químicas e composicionais são independentes dos processos e condições de humificação. Além disso, a origem pirogênica do carbono nas TPIs o aproxima mais do *Black Carbon*, sendo tal conclusão de acordo com a obtida por Zech *et al.*,<sup>24</sup> que alegaram que devido à origem das SHs em TPIs serem de materiais carbonizados os indicadores convencionais para a avaliação das MOS ou fertilidade de SNAs de climas temperados não seriam adequados para as TPIs da Bacia Amazônica.

As relações  $C_{EA}/C_H$  apresentaram uma grande variação, com valores entre 1,2 e 4,9 (Tabela 3). As relações  $C_{EA}/C_H$  da área P01 foram estatisticamente superiores ( $p < 0,05$ ) em 57% dos casos avaliados, com exceção da camada mais superficial (0-5 cm) e nas profundidades maiores (60-100 cm). Todos os SNAs e 85% das amostras da área P01 apresentaram valores de relação  $C_{EA}/C_H > 2,0$ ; não sendo o mesmo observado para a área P02 que apresentou relação  $C_{EA}/C_H < 2,0$  ao longo de todo o perfil avaliado. A relação  $C_{EA}/C_H$  fornece importantes informações sobre os processos pedogênicos desses solos.<sup>30</sup> Além disso, foi observado que em todos os cinco solos avaliados não ocorreu um padrão acentuado de acréscimo ou decréscimo da relação  $C_{EA}/C_H$ , indicando que ocorrem inúmeros fatores que influenciam na proporção de SHs alcalinossolúveis ou insolúveis, podendo se considerar o material vegetal de origem, o aporte de carvões, assim como o ambiente pedogênico e o clima.<sup>26</sup>

Assim como nesse estudo, Santos *et al.*,<sup>41</sup> encontraram baixos valores de relação  $C_{EA}/C_H (< 1,1)$  em todos os horizontes pedológicos de TPIs e “Terras Mulatas” sob

diferentes culturas agrícolas (cacau e *brachiaria*) na cidade de Apuí, Amazonas. As menores relações  $C_{EA}/C_H$  apresentadas no presente estudo podem servir de indicativo da força da estabilidade da MOS e/ou forte interação com a matriz mineral do solo, o que por si também é uma forma de estabilidade da MOS. Ao que tudo indica, nas TPIs, a formação de complexos organomineais constitui-se em um mecanismo muito mais importante na estabilidade da MOS. O  $C_H$  nessas TPIs devem ser compostos primariamente por *Black Carbon* como produtos de pirólises pelas populações pré-Colombianas, o que implicou em menores contribuições nas frações  $C_{AH}$  e  $C_{AF}$ ,<sup>42</sup> com isso sugerindo a forte presença de estruturas aromáticas poli-condensadas (não extraíveis com NaOH) com significativa interação organo-mineral.<sup>41</sup>

### 3.3. Estoques de carbono das substâncias húmicas

Os ECs das áreas P01 e P02 variaram de 2,5 a 15,0 Mg Ha<sup>-1</sup> (Tabela 4). Além disso, foi observado que os  $EC_{AF}$  e os  $EC_{AH}$  da área P01 foram estatisticamente superiores ( $p < 0,01$ ) aos apresentados pela área P02 em 43% dos casos de ambas as áreas avaliadas. Por outro lado, os  $EC_H$  da área P02 foram superiores estatisticamente ( $p < 0,01$ ) em 57% dos casos. Entre os SNAs foi observado que os ECs variaram de 2,1 a 24,6 Mg Ha<sup>-1</sup> (Tabela 4), sendo os  $EC_{AH}$  predominante entre todas as camadas das SHs de todos os SNAs. As somas dos estoques de carbono das diferentes frações das SHs ( $EC_{Soma} = EC_{AF} + EC_{AH} + EC_H$ ) de todas as cinco áreas avaliadas estiveram muito próximas aos valores obtidos pela determinação do ECs nos solos inteiros ( $EC_{Total}$ ), como pode ser observado pelas taxas de recuperação (R%) que variaram entre 89,2 a 110,4%, sendo consideradas satisfatórias, mesmo utilizando-se uma técnica de fracionamento químico com inúmeras manipulações e etapas de solubilização com o uso de extratores com diferentes unidades de pH.

Os valores da capacidade total de estocagem de carbono das TPIs em um metro de profundidade estariam, aproximadamente, 18% abaixo dos valores apresentados pelos SNAs (P03: 150,5 Mg Ha<sup>-1</sup>; P04: 160,2 Mg Ha<sup>-1</sup> e P05: 165,0 Mg Ha<sup>-1</sup>), caso não se atentasse ao importante detalhe que esses valores de ECs em profundidade dos SNAs são relativos à uma profundidade total que é o dobro (2 m) daquelas das TPIs. Além disso, foi observado que mesmo entre os SNAs a capacidade de agirem como drenos de carbono são muito próximas entre si, pois o SNA P05 foi capaz de estocar mais carbono ao longo do perfil apenas em 9,1% e 2,9%, quando comparado com os valores totais apresentado pelos SNAs P03 e P04, respectivamente. As somas  $EC_{Totais}$  das quatro camadas mais superficiais das TPIs desse estudo foram muito próximas das somas de EC (0-30 cm) determinados em solos de TPI sob cultivo de Citros no município de Manacapuru (AM).<sup>11</sup>

Surpreendentemente, embora a área P02 possua o dobro de tempo de pousio (20 anos) da área P01, ao se somarem os  $EC_{Totais}$  de todas as camadas (1 m) das TPIs

foi observado que as duas áreas possuem estatisticamente ( $p < 0,01$ ) a mesma capacidade de atuação como dreno de carbono ao longo de todo o perfil de solo avaliado (P01: 132,6 Mg Ha<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> e P02: 136,4 Mg Ha<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>), estando esses resultados de acordo com o observado por Soares *et al.*,<sup>43</sup> que ao efetuarem o fracionamento físico da MOS nessas mesmas amostras identificaram  $EC_{Totais}$  estatisticamente semelhantes ( $p < 0,05$ ) ao desse estudo, segundo o Teste t de Student (P01: 116,5±9,2 Mg Ha<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> e P02: 137,0±7,9 Mg Ha<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>). Além disso, estudos anteriores indicam que a área P02 possui uma maior presença visual de artefatos líticos, cacos cerâmicos e carvões do que a área P01,<sup>12,13</sup> o que poderia explicar o predomínio do  $EC_H$  da área P02 e porquê embora, como indicado por Soares *et al.*,<sup>43</sup> essa mesma área possua um EC aproximadamente 1,8 vezes superior ao identificado para a área P01 nas frações leves da MOS (Fração Leve Livre e Fração Leve Intra-Agregado),<sup>43</sup> possua apenas 63% do  $EC_{AF}$  apresentado pela área P01 (Tabela 4 e Figura 1). Segundo Madari *et al.*,<sup>7</sup> variações nas distribuições dos estoques de carbono das SHs em um mesmo sítio arqueológico servem como indício da disposição irregular dos rejeitos carbonizados preteritamente pelos povos pré-Colombianos ao longo de vários séculos.

Pode-se deduzir que parte significativa da MOS presente nas frações leves da área P02, embora pouco densas, não sejam oriundas do aporte de material vegetal fresco e lábil da floresta em consolidação (serapilheira ou liteira), mas que sejam materiais particulados de origem pirogênica (carvões) depositados pelas populações pré-Colombianas e possuam uma natureza recalcitrante semelhante ao *Black Carbon*,<sup>7</sup> que uma vez exposto ao fracionamento químico da MOS, como nesse estudo, é preferencialmente extraído junto à Fração Humina e praticamente inerte às condições de solubilidade para a extração da Fração Ácido Fúlvico. Por outro lado, a área P01 por possuir menor evidência visual de carvões em suas frações leves e lábeis, conforme indicado por Soares *et al.*,<sup>43</sup> apresenta preferencialmente um significativo aporte de material vegetal recentemente depositado pela floresta como fonte de MOS, com isso privilegiando o  $EC_{AF}$  quando comparado com essa mesma SH da área P02 (Figura 1).

Os SNAs ao apresentarem baixos indícios de materiais de origem pirogênica não antrópicos, se comportaram como solos que recebem basicamente o aporte da MOS sob a forma de serrapilheira e devido ao tempo de pousio e à conversão de florestas secundárias estão passando por um processo de acentuação da humificação intermediária da MOS, como pode ser observado pelo predomínio do  $EC_{AH}$  (Tabela 4).

Resumindo, como pode ser observado na Figura 1, ao se avaliarem as distribuições dos ECs das diferentes frações das SHs para todos os solos avaliados pode-se observar três tendências distintas: a área P01 estoca, preferencialmente, mais carbono nas frações mais solúveis e móveis das SHs ( $EC_{AF} > EC_{AH} > EC_H$ ); a TPI P02 apresenta uma maior capacidade de estocar carbono nas frações mais estáveis



**Tabela 4.** Estoques de carbono nas substâncias húmicas dos solos avaliados

Profundidade (cm)	EC <sub>AF</sub> <sup>a</sup>	EC <sub>AH</sub> <sup>b</sup>	EC <sub>H</sub> <sup>c</sup>	EC <sub>Soma</sub>	EC <sub>Total</sub>	R (%)
----- Mg Ha <sup>-1</sup> -----						
P01 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico						
0 - 5	6,3±3,9a	2,9±1,5a	2,5±0,7a	11,7±5,0a	12,4±3,1a	94,3±47,0a
5 - 10	5,3±2,0a	3,9±1,8a	3,4±0,8a	12,6±2,7a	11,6±0,8a	107,9±26,7a
10 - 20	6,7±1,8a	7,3±2,0a	3,6±0,5a	17,7±4,2a	19,3±2,4a	91,6±18,3a
20 - 40	14,2±5,8a	13,7±4,3a	5,6±0,9a	33,6±7,8a	30,4±11,1a	110,4±20,4a
40 - 60	9,6±2,9a	5,4±1,7a	3,3±1,2a	18,3±6,0a	19,8±10,3a	93,1±26,9a
60 - 80	13,0±5,8a	3,1±1,6a	6,0±2,4a	22,1±6,8a	21,9±8,5a	101,2±18,2a
80 - 100	8,0±0,6a	1,3±0,6a	7,2±3,0a	16,5±3,1a	17,2±6,6a	96,9±24,0a
P02 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico						
0 - 5	5,8±2,8a	5,2±1,0a	6,0±0,5b	17,0±3,2a	18,5±2,7a	92,3±14,0a
5 - 10	2,5±0,4b	2,5±0,3b	4,1±0,3a	9,1±0,6a	10,3±1,5a	89,2±16,2a
10 - 20	6,1±1,2a	5,4±0,7b	8,1±0,7b	19,7±1,2b	20,7±2,8a	96,1±17,4
20 - 40	9,0±1,1a	12,7±2,0a	15,0±0,2b	36,6±3,0b	34,0±4,8a	108,1±15,6a
40 - 60	8,5±3,7a	7,4±2,0a	11,4±0,4b	27,3±5,4a	26,2±2,1a	103,9±13,1a
60 - 80	4,6±1,6b	4,2±1,4b	7,0±0,9a	15,7±2,9a	16,4±2,9a	96,0±24,4a
80 - 100	3,7±0,8b	2,5±0,6a	4,8±0,8a	11,0±1,1b	10,3±1,0a	107,0±7,1a
P03 - Argissolo Amarelo Distrófico plúntico de textura média/argilosa						
0 - 23	7,4±0,6	20,4±0,5	10,4±0,6	38,2±0,5	37,6±1,5	101,8±2,0
23 - 38	3,9±0,6	7,7±0,8	6,7±0,5	18,3±0,8	20,1±0,7	90,7±4,7
38 - 50	2,1±0,8	5,9±0,5	3,4±0,9	11,4±2,0	12,4±0,4	91,9±13,0
50 - 77	2,8±1,5	13,7±1,5	5,5±1,3	22,1±3,6	21,1±0,9	105,7±16,1
77 - 110	3,0±0,9	13,5±2,2	5,3±1,7	21,8±4,8	19,7±1,1	109,5±6,6
110 - 200	7,8±2,6	24,6±2,3	8,6±2,9	41,0±2,5	39,6±4,7	103,7±2,8
P04 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico de textura média/argilosa						
0 - 10	8,9±0,2	14,9±0,1	10,8±0,2	34,7±0,3	33,2±1,1	104,8±14,1
10 - 25	3,8±1,0	10,8±0,1	5,9±0,8	20,5±1,6	22,2±0,8	92,1±9,5
25 - 70	6,6±0,6	17,0±1,1	12,0±1,6	35,6±1,3	36,5±1,4	96,7±14,7
70 - 120	4,8±1,1	14,1±0,6	9,7±1,8	28,6±2,5	29,4±1,1	96,4±11,3
120 - 200	7,6±2,7	19,1±1,3	11,1±3,3	37,8±4,9	38,9±1,5	96,5±11,2
P05 - Argissolo Amarelo Distrófico plúntico de textura média/argilosa						
0 - 30	10,1±1,0	24,1±1,6	13,9±4,1	48,1±4,8	46,5±1,8	104,3±10,7
30 - 50	4,2±0,9	17,9±1,2	9,7±0,6	31,8±1,4	28,0±1,1	114,3±8,3
50 - 96	5,4±1,0	15,7±3,5	10,3±3,0	31,3±3,5	29,6±1,1	105,8±14,7
96 - 140	6,6±0,4	16,9±2,5	7,7±0,7	31,2±2,7	30,6±1,2	103,4±4,8
140 - 200	8,0±1,5	15,0±5,8	10,2±2,9	33,3±2,0	30,3±2,0	109,2±8,5

<sup>a</sup>EC<sub>AF</sub>: Estoque de Carbono Ácido Fúlvico. <sup>b</sup>EC<sub>AH</sub>: Estoque de Carbono Ácido Húmico. <sup>c</sup>EC<sub>H</sub>: Estoque de Carbono Humina. EC<sub>Soma</sub>: Estoque de Carbono da Soma das Substâncias Húmicas. EC<sub>Total</sub>: Estoque de Carbono Total. Comparação entre as médias feitas pelo teste Tukey (HSD). Valores seguidos pela mesma letra numa mesma coluna não são significativamente diferentes pelo Teste F da análise de variância (p < 0,05) e/ou (p < 0,01).

e recalcitrantes da MOS (EC<sub>H</sub> > EC<sub>AH</sub> > EC<sub>AF</sub>) e todos os SNAs apresentaram a tendência de estocar carbono preferencialmente nas frações com grau de humificação intermediárias (EC<sub>AH</sub> > EC<sub>H</sub> > EC<sub>AF</sub>).

Assim como apontado por Marques *et al.*,<sup>26</sup> identificar a distribuição dos estoques de carbono entre diferentes frações (físicas ou químicas) de solos sob floresta da Região Amazônica permite auxiliar em um melhor entendimento

a respeito dos impactos do DMUT sobre a estabilidade da MOS, com isso subsidiando uma necessária preocupação em relação aos projetos nacionais de desenvolvimento econômico que reduzam, indiscriminadamente, áreas de Florestas Tropicais Úmidas em prol do aumento da produção de commodities agropecuárias que visam, basicamente, a exportação ao mercado consumidor mundial de alimentos. Contudo, embora a remoção da cobertura vegetal natural

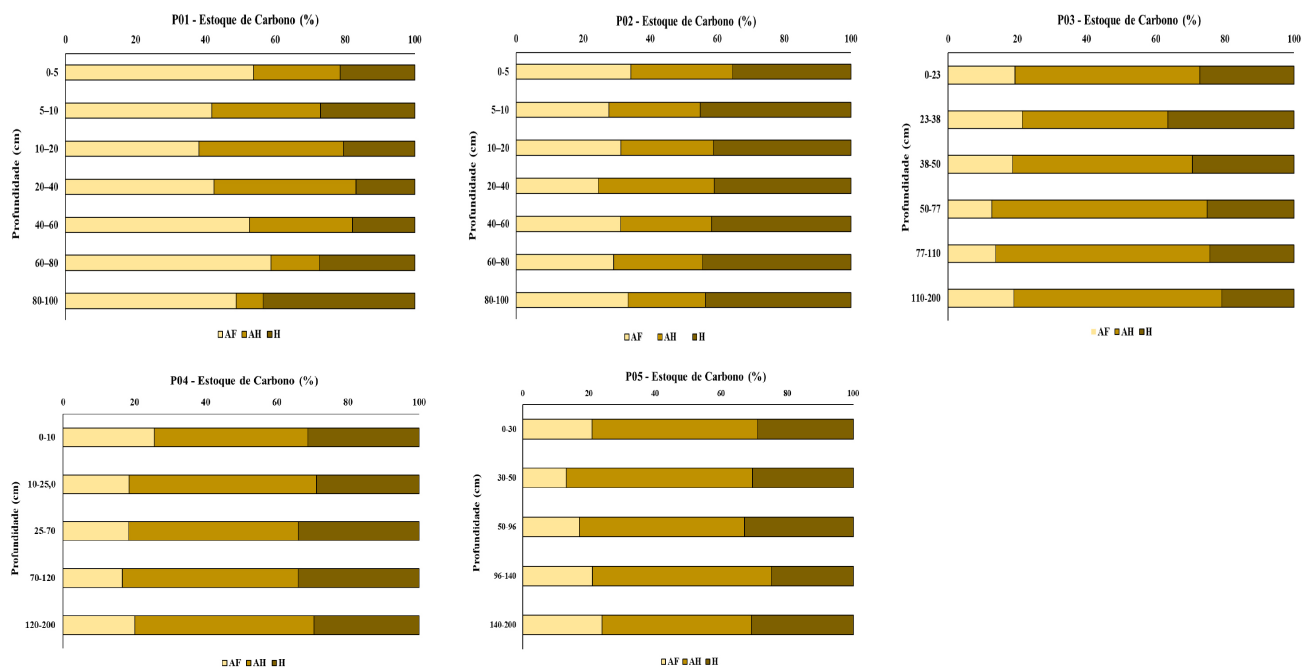


Figura 1. Distribuição dos estoques de carbono das Substâncias Húmicas entre Terras Pretas de Índio e Solos Não Arqueológicos da Amazônia Central

em solos arenosos, como é o caso de todos os solos desse estudo,<sup>12,13</sup> acarrete em mudanças significativas e praticamente imediatas na redução do carbono estocado na MOS são necessários estudos posteriores que considerem as vulnerabilidades às emissões de GEE de mais classes de solos típicos da Amazônia (arqueológicos e não arqueológicos) e submetidos a maiores intervalos de tempo de pousio para conversão em florestas secundárias.

#### 4. Conclusões

As áreas de Terras Pretas de Índio apresentaram distribuições distintas nas concentrações de carbono das substâncias húmicas dos solos P01 e P02, que refletiram a quantidade e, principalmente, a qualidade da Matéria Orgânica do Solo aportada (serrapilheira pela floresta secundária em consolidação ou *black carbon* pela população pré-Colombiana), não sendo a variação do tempo de pousio um parâmetro relevante *per se*. Consequentemente, a área P01 apresentou estoques de carbono predominante nas frações Ácidos Fúlvicos (móveis e solúveis), enquanto a área P02 possui o estoque de carbono preferencialmente retido à fração Humina (complexa e estável). Além disso, a área P02 ao ter o dobro do tempo de pousio (20 anos), quando comparada à área P01 (10 anos), não apresentou uma maior capacidade de estocar carbono no solo, mas refletiu o predomínio de estoque de carbono mais estável de origem pirogênica que foi preferencialmente retido na fração Humina da Matéria Orgânica do Solo, que por sua vez possui uma maior interação com a matriz mineral do solo por forças de interação físicas e químicas, com isso sendo menos vulnerável à lixiviação ou à emissão de CO<sub>2</sub>

atmosférico por mineralização da matéria orgânica do solo.

Todos os solos não antrópicos apresentaram uma mesma distribuição de Substâncias Húmicas, porém pouco usual em solos amazônicos, ao concentrarem um maior estoque de carbono na fração Ácidos Húmicos (humificação intermediária), indicando que os respectivos períodos de pousio proporcionaram uma certa estabilização das substâncias húmicas que não foram perdidas significativamente nem por lixiviação, consumo microbiológico, nem tampouco por mineralização. Contudo, quando comparado com as Terras Pretas de Índio, ficou evidenciado a baixa capacidade de estocagem de carbono dos Argissolos típicos da Região Amazônica, pois embora possuíssem o dobro de profundidade (200 cm) apresentaram um estoque de carbono apenas 18% acima ao apresentado por esses solos, com isso reforçando a necessidade de preservação desses sítios arqueológicos para que possam desempenhar o seu importante papel no ciclo do carbono como eficientes drenos de CO<sub>2</sub> atmosférico do Sistema Terra.

#### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

#### Referências Bibliográficas

1. Silva, C. M.; Arbilla, G; Antropoceno: Os Desafios de um Novo Mundo. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 1619. [Crossref]

2. McNeill, J. R.; The Great Acceleration: An Environmental History of the Anthropocene since 1945, Harvard University Press: Cambridge, 2016.
3. Silva, C. M.; Arbilla, G.; Machado, W.; Soares, R.; Radionuclídeos como marcadores de um novo tempo: o Antropoceno. *Química Nova* **2020**, *43*, 506. [[Crossref](#)]
4. Desjardins, T.; Barros, E.; Sarrazin, M.; Girardin, C.; Mariotti, A.; Effects of forest conversion to pasture on soil carbon content and dynamics in Brazilian Amazonia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **2004**, *103*, 365. [[Crossref](#)]
5. Durrer, A.; Margenot, A. J.; Silva, L. C. R.; Bohannan, B. J. M.; Nusslein, K.; van Haren, J.; Andreote, F. D.; Parikh, S. J.; Rodrigues, J. L. M.; Beyond total carbon: conversion of amazon forest to pasture alters indicators of soil C cycling. *Biogeochemistry* **2021**, *152*, 179. [[Crossref](#)]
6. Tadini, A. M.; Nicolodelli, G.; Senesi, G. S.; Ishida, D. A.; Montes, C. R.; Lucas, Y.; Mounier, S.; Guimarães, F. E. G.; Milori, D. M. B. P.; Soil organic matter in podzol horizons of the Amazon region: Humification, recalcitrance, and dating. *Science Total Environmental* **2018**, *613*, 160. [[Crossref](#)]
7. Madari, B. E.; Cunha, T. J. F.; Soares, R.; Organic Matter of the Anthropogenic Dark Earths of Amazônia. *Dynamic Soil, Dynamic Plant* **2011**, *5*, 21. [[Crossref](#)]
8. Mello, M. L. V. C. B. de M.; Soares, R.; Matéria Orgânica em Solos Arqueológicos Amazônicos: Uma Revisão. *Diversidade e Gestão* **2017**, *1*, 189. [[Link](#)]
9. Glaser, B.; Birk, J. J.; State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta* **2012**, *82*, 39. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
10. Novotny, E. H.; Hayes, M. H. B.; Bonagamba, T. J.; Eduardo, R.; Song, G.; Nogueira, C. M.; Mangrich, A. S.; Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon Region for the Utilisation of Charcoal for Soil Amendment. *Journal of Brazilian Chemical Society* **2009**, *20*, 1003. [[Crossref](#)]
11. Chagas, L. F. B.; Falcão, N. P. S.; Padilha, F. J.; Oliveira, D. M.; Guimarães, R. S.; De Campos, D. V. B.; Walverde, E. M.; Ferreira, P. H. Z.; Soares, R.; Avaliação do Impacto do Cultivo de Citros sobre os Estoques de Carbono e Nitrogênio das Frações Leves da Matéria Orgânica de Solos Antrópicos (Terras Pretas de Índio) e Solos Adjacentes (Latossolos) da Amazônia Central. *Revista Virtual de Química* **2017**, *9*, 2067. [[Crossref](#)]
12. Soares, R.; Maddock, J. E. L.; Campos, D. V. B.; Madari, B. E.; Machado, P. L. O. A.; Santelli, R. E.; O Papel das Terras Pretas de Índio no Antropoceno. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 1659. [[Crossref](#)]
13. Soares, R.; Maddock, J. E. L.; Campos, D. V. B.; Madari, B. E.; Machado, P. L. O. A.; Santelli, R. E.; Avaliação da Estabilidade de Agregados em Marcadores Ambientais Terrestres do Antropoceno Submetidos a Diferentes Períodos de Pousio. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 1693. [[Crossref](#)]
14. Solomon, D.; Lehmann, J.; Thies, J.; Schäfer, T.; Liang, B.; Kinyangi, J.; Neves, E.; Petersen, J.; Luizão, F.; Skjemstad, J.; Molecular signature and sources of biochemical recalcitrance of organic C in Amazonian Dark Earths. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **2007**, *71*, 2285. [[Crossref](#)]
15. Sombroek, W.; Kern, D.; Rodrigues, T.; Cravo, M. D. S.; Cunha, T. J. F.; Woods, W.; Glaser, B.; Terra preta e terra mulata: suas potencialidades agrícolas, suas sustentabilidades e suas reproduções. *Terra Preta Nova* **2009**, 251. [[Link](#)]
16. Zech, W.; Senesi, N.; Guggenberger, G.; Kaiser, K.; Lehmann, J.; Miano, T. M.; Miltner, A.; Schroth, G.; Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* **1997**, *79*, 117. [[Crossref](#)]
17. Aquino, R. E. de; Marques, J.; Campos, M. C. C.; Oliveira, I. A. de; Bahia, A. S. R. de S.; dos Santos, L. A. C.; Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. *Geoderma* **2016**, *262*, 35. [[Crossref](#)]
18. Glaser, B.; Balashov, E.; Haumaier, L.; Guggenberger, G.; Zech, W.; Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Organic Geochemistry* **2000**, *31*, 669. [[Crossref](#)]
19. Lemos, V. P.; De Oliveira Meireles, A. R.; Das Graças Fernandes, K.; De Moraes, M. C.; Da Costa, M. L.; Silva, A. K. T.; Kern, D. C.; Nutrients in Amazonian black earth from Caxiuanã region. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2011**, *22*, 772. [[Crossref](#)]
20. Silva, L. C. R.; Corrêa, R. S.; Wright, J. L.; Bomfim, B.; Hendricks, L.; Gavin, D. G.; Muniz, A. W.; Martins, G. C.; Motta, A. C. V.; Barbosa, J. Z.; Melo, V. de F.; Young, S. D.; Broadley, M. R.; Santos, R. V.; A new hypothesis for the origin of Amazonian Dark Earths. *Nature Communications* **2021**, *12*, 127. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
21. Benites, V. M.; Madari, B.; Machado, P. L. O. A.; *Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo*. Comunicado Técnico 16, Embrapa Solos: Rio de Janeiro, 2003. [[Link](#)]
22. Cunha, T. J. F.; Madari, B. E.; Benites, V. D. M.; Canellas, L. P.; Novotny, E. H.; Moutta, R. D. O.; Trompowsky, P. M.; Santos, G. D. A.; Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte a antrópico da Amazônia (Terra Preta). *Acta Amazonica* **2007**, *37*, 91. [[Crossref](#)]
23. Cunha, T. J. F.; Madari, B. E.; Canellas, L. P.; Ribeiro, L. P.; Benites, V. M.; Santos, G. A.; Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian Amazon basin. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2009**, *33*, 85. [[Crossref](#)]
24. Roscoe, R.; Machado, P. L. O. de A.; *Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica*, 1a. ed., Embrapa: Dourados, 2002.
25. Lima, H. N.; Schaefer, C. E. G. R.; Mello, J. W. V.; Ker, J. C.; Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. *Geoderma* **2002**, *110*, 1. [[Crossref](#)]
26. Zech, W.; Haumaier, L.; Hempfling, R.; *Em Humic substances in soil and crop sciences: selected Readings*. McCarthy, P.; Clapp, C.E.; Malcolm, R. L.; Blomm, P. R., eds.; ASA: Madison, 1990, cap.3.
27. Marques, J. D. de O.; Luizão, F. J.; Teixeira, W. G.; Nogueira, E. M.; Fearnside, P. M.; Sarrazin, M.; Soil Carbon Stocks

- under Amazonian Forest: Distribution in the Soil Fractions and Vulnerability to Emission. *Open Journal of Forestry* **2017**, *7*, 121. [[Crossref](#)]
28. Marques, J. D. de O.; Luizão, F. J.; Teixeira, W. G.; Sarrazin, M.; Filgueira Ferreira, S. J.; Beldini, T. P.; de Araújo Marques, E. M.; Distribution of Organic Carbon in Different Soil Fractions in Ecosystems of Central Amazonia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2015**, *39*, 232. [[Crossref](#)]
29. Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G.; *Manual de métodos de análise de solo*, 2ª ed., EMBRAPA: Brasília, 2017.
30. Swift, R. S.; Em *Methods of soil analysis matter characterization*; Sparks, D. L.; Page, A. L.; Helmke, P. A.; Loeppert, R. H.; Soltanpour, P. N.; Tabatabai, M. A.; Johnston, C. T.; Sumner, M. E.; eds., Soil Science Society of America/ American Society of Agronomy: Madison, 1996, cap. 15.
31. Stevenson, F. J; *Humus chemistry: Genesis composition and reactions*, 2a.ed., John Wiley & Sons: New York, 1994.
32. Ebeling, A. G.; Anjos, L. H. C.; Perez, D. V.; Pereira, M. G.; Gomes, F. W. F; Atributos químicos, carbono orgânico e substâncias húmicas em Organossolos háplicos de várias regiões do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 2011, *35*, 325. [[Crossref](#)]
33. Volkoff, B.; Natureza do húmus nos latossolos distróficos da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **1978**, *2*, 59. [[Link](#)]
34. Volkoff, B.; Cerri, C. C; L'húmus des sols du Brésil: nature et relation avec l'environnement. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie* **1988**, *24*, 83. [[Link](#)]
35. Portugal, A. F.; Jucksch, I.; Schaefer, C. E. G. R.; Wendling, B; Determinação de estoques totais de carbono e nitrogênio e suas frações em sistemas agrícolas implantados em argissolo vermelho-amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 2008, *32*, 2091. [[Crossref](#)]
36. Canella, L. P.; Berner, P. G.; Silva, S. G.; Silva, M. B.; Santos, G. A; Frações da matéria orgânica em seis solos de uma toposequência no Estado do Rio de Janeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **2000**, *35*, 133. [[Crossref](#)]
37. Canellas, L. P.; Velloso, A. C. X.; Marciano, C. R.; Ramalho, J. F. G. P.; Rumjanek, V. M.; Rezende, C. E.; Santos, G. A; Propriedades químicas de um cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2003**, *27*, 935. [[Crossref](#)]
38. Vale, J. F.; Nicodem, S.; Melo, V. F.; Uchôa, S. C. P.; Cruz, D. L. S; Characterization of Organic Matter under Different Pedoenvironments in the Viruá National Park, in Northern Amazon. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2016**, *40*, 1. [[Crossref](#)]
39. Kononova, M. M; *Materia organica del suelo: su naturaleza, propiedades y métodos de investigación*. 1a. ed., Oikos-tau: Barcelona, 1982.
40. Orlov, D. S; *Humus acids of soils*, 1a. ed., USDA: New York, 1985.
41. Maccallister, D. L.; Chien, W. L; Organic carbon quality and forms as influenced by tillage and cropping sequence. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **2000**, *31*, 465. [[Crossref](#)]
42. Santos, L. A. C.; Araujo, J. K. S.; Souza, V. S.; Campos, M. C. C.; Corrêa, M. M.; Souza, R. A. S; Pedogenesis in an Archaeological Dark Earth – Mulatto Earth Catena over Volcanic Rocks in Western Amazonia, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 2018, *42*, 1. [[Crossref](#)]
43. Soares, R.; Maddock, J. E. L.; Campos, D. V. B.; Madari, B. E.; Machado, P. L. O. A; Determinação dos Estoques de Carbono e Nitrogênio nas Frações Físicas da Matéria Orgânica em Solos Antrópicos (Terra Preta de Índio) e Não Antrópicos da Amazonia Central. *Revista Virtual de Química* 2022, *14*, 292. [[Crossref](#)]