



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA- UFRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**ADRIANO DOS SANTOS MOURA**

**PROPRIEDADES FÍSICAS E MINERALÓGICA DO SOLOS DE TERRA PRETA  
ARQUEOLÓGICA NA AMAZÔNIA**

**Belém  
2022**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA- UFRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**ADRIANO DOS SANTOS MOURA**

**PROPRIEDADES FÍSICAS E MINERALÓGICA DO SOLO EM TERRA PRETA  
ARQUEOLÓGICA NA AMAZÔNIA**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Herdjanira Veras de Lima

Co-orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Helena Pinto de Lima

**Belém  
2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia  
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- M929p Moura, Adriano dos Santos Moura  
Propriedades físicas e mineralógica do solos de terra preta arqueológica na Amazônia / Adriano dos Santos Moura Moura. - 2022.  
65 f. : il. color.
- Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2022.  
Orientador: Profª. Dra. Herdjania Veras de Lima Lima  
Coorientador: Profª. Dra. Helena Pinto de Lima.
1. Terra preta. 2. Propriedades Físicas . 3. Mineralogia . 4. Arqueologia . I. Lima, Herdjania Veras de Lima , *orient.* II. Título
- 

CDD 631.43

**ADRIANO DOS SANTOS MOURA**

**PROPRIEDADES FÍSICAS E MINERALÓGICA DO SOLO EM TERRA PRETA  
ARQUEOLÓGICA NA AMAZÔNIA**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Doutor. Área de concentração: Agronomia.

**Aprovado em 28 de Fevereiro de 2022**

**BANCA EXAMINADORA**

*Herdjania Veras de Lima*

Dra. Herdjania Veras de Lima - Orientador  
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

**Assinado de forma digital por  
Daiane de Cinque Mariano  
Dados: 2023.02.20 10:21:11 -03'00'**

Dra Daiane de Cinque Mariano – 1ºExaminador  
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA  
Documento assinado digitalmente

**gov.br** MARIA DE LOURDES PINHEIRO RUIVO  
Data: 17/02/2023 11:26:35-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Dra Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo – 2º Examinador  
Museu Paraense Emílio Goeldi - MPEG

*Milena Carvalho de Moraes*

Dra Milena Carvalho de Moraes – 3ºExaminador  
Museu Paraense Emílio Goeldi - MPEG

Documento assinado digitalmente

**gov.br** NEWTON PAULO DE SOUZA FALCAO  
Data: 28/02/2023 17:44:23-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Dr. Newton Paulo de Souza Falcão – 4ºExaminador  
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA)

## AGRADECIMENTOS

À Deus pelo Dom da Vida, que com seu poder supremo, deu-me força, sabedoria, para guiar minhas ações durante esta caminhada e disposição para enfrentar todas as etapas da minha vida.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia pela oportunidade para realização deste curso. A Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA), pelo auxílio financeiro e apoio concedido, essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

A minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dra. Herdjania Veras de Lima pela oportunidade de orientação. Obrigada pelos seus ensinamentos, apoio, exemplo e motivação.

A minha co-orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dra. Helena Lima por ter me concedido a primeira oportunidade de iniciar meus estudos com Terra Preta Arqueológica, por ter viabilizado a coleta das amostras e por seu auxílio durante a coleta das mesmas.

Minha eterna gratidão, à Dra. Katiane Raquel, pelo apoio e logísticas de campo para a coleta das amostras.

Aos queridos amigos de física do solo: Decíola, Daynara, Peola, Robson, pelos momentos de descontração e aprendizado; aos amigos do programa PGAgro, Daihany, Leticia, Melri, Deborah, Grazi, Yan, todos os momentos de alegria, descontração e aprendizados compartilhados

Ao Laboratório de solos da UFRPE, que me acolheram tão bem no período das análises laboratoriais e pela ajuda e suporte durante esta etapa.

Aos meus pais Raimundo Alves e Maria Helena, minha querida irmã Adrielle Moura por ser minha grande amiga e incentivadora não só na realização deste trabalho como em toda minha vida estudantil. Obrigado por sempre estarem comigo me incentivando e auxiliando em todos os momentos. Vocês são minha fonte de incentivo para sempre seguir em frente.

Os meus sinceros agradecimentos.

Muito Obrigado!

## RESUMO

Na região amazônica, os solos antropogênicos são férteis e sustentáveis, conhecidos como solos Terra Preta (TPA), são resultados de profundas modificações provocadas pelas atividades humanas. Elas ocorrem em diversas classes de solos, em faixas descontínuas pela região amazônica que pode chegar a metros (m) ou a quilômetro (km). O arquipélago do Marajó apresenta vários sítios arqueológicos e alguns estão localizados em Gurupá-PA, uma região que apresenta uma transição indígena-europeia, e com comunidades e vilas exercendo o extrativismo de forma organizacional. Os solos de terra preta presentes nos sítios arqueológicos apresentam faixas descontínuas, coloração escura e com espessura que pode chegar a 1 metro ou mais. Logo, levantou-se a hipótese de que as propriedades físicas do solo são semelhantes em todos os solos considerados terra preta arqueológica. Com isso, objetivo geral é avaliar as propriedades física do solo e os minerais ligado a argila em terra preta arqueológica e suas adjacências em busca de respostas para entender a formação das TPA. Para buscar resposta para o objetivo geral foi estabelecido os objetivos específicos, os mesmos correspondem a cada capítulo da tese. No primeiro buscou-se verificar a classificação textural através do pré-tratamento com queima da matéria orgânica em solo de terra preta. No segundo buscou-se caracterizar os atributos dos solos de terras pretas arqueológicas no município de Gurupá. O resultado do primeiro trabalho mostrou que a matéria orgânica em solos de terra preta pode influenciar na textura do solo e que a queima da MO com peróxido em níveis alto pode subestimar a classificação textural. O resultado referente ao segundo, os maiores agregados do solo estão na malha de diâmetro maior 4mm, predominância de minerais da fração argila caulinita com presença de strengite, anástasio, albite, minerais estes observados em solos de TPA.

**Palavras-chaves:** Amazônia; modificações; Estabilidade de agregado; Matéria orgânica; estoque de carbono

## ABSTRACT

In the Brazilian Amazon region, anthropogenic soils are fertile and sustainable, known Black Earth (BE) soils, are the result of profound modifications caused by unintentional human activities, occurring in various soil classes, are found discontinuous bands by the Amazon region that can reach meters (m) or kilometer (km). The Marajó archipelago presents several archeological sites and some are located in Gurupá-PA, a region that presents an indigenous-European transition, and with communities and villages exercising extractivism in an organized way. The black earth soils present in the archeological sites present a discontinuous band, dark in color, and with a thickness that can reach 1 meter (m) or 30 centimeters (cm). Therefore, it was hypothesized that the physical properties of the soil are similar in all soils considered to be archaeological black earth. Thus, the general objective is to evaluate the physical properties of the soil and clay-bonded minerals in archaeological black earth and its surroundings in search of answers to understand the formation of the TPA. In order to find an answer to the general objective, specific objectives were established, corresponding to each chapter. In the first, it was sought to verify the textural classification through the pre-treatment with burning of organic matter in black earth soil. In the second, we sought to characterize archaeological black earth soils in the municipality of Gurupá. The result of the work showed that an organic matter in black earth soils can first influence the soil texture and that the burning of OM with per at high levels can underestimate the texture classification. The second result, the largest soil aggregates are in the mesh with a larger diameter of 4mm, predominance of ores from the kaolinite literature with the presence of strengite, anastasio, albite, these minerals observed in TPA soils.

**Keywords:** Amazon; modifications; aggregate stability; organic matter; carbon stock

## LISTA DE FIGURA

### Capítulo 3

- FIGURA 1:** LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO NA CIDADE DE GURUPÁ, ESTADO DO PARÁ. .... 35
- FIGURA 2:** ANÁLISE REALIZADA COM AMOSTRAS DE SOLO DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICO E SOLO ADJACENTE COM DIFERENTES VOLUMES DE PERÓXIDOS NO MUNICÍPIO DE GURUPÁ, PA. (A) TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA 1; (B) TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA 2; (C) SOLO ADJACENTE 1. .... 38
- FIGURA 3:** ANÁLISE REALIZADA COM AMOSTRAS DE SOLO DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICO E SOLO ADJACENTE COM DIFERENTES VOLUMES DE PERÓXIDOS NA FLONA DE CAXUANÃ. (D) TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA 3; (E) TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA 4; (F) SOLO ADJACENTE 2. .... 39
- FIGURA 4:** ANÁLISE REALIZADA COM AMOSTRAS DE SOLO ARQUEOLÓGICO DE TERRA PRETA E SOLOS ADJACENTES COM DIFERENTES TEMPOS (H) DE QUEIMA PELA MUFLA A 600°C. (A) TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA 1; (B) TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA 2; (C) SOLO ADJACENTE 1; (D) TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA 3; (E) TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA 4; (F) SOLO ADJACENTE 2. .... 41
- FIGURA 5:** CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL DE TODAS AS AMOSTRAS QUE FORAM APLICADOS PELO PRÉ TRATAMENTO (QUEIMA) DA MATÉRIA ORGÂNICA, PELA MUFLA A 600° C. .... 41

### CAPÍTULO 4

- FIGURA 1:** LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO NA CIDADE DE GURUPÁ, ESTADO DO PARÁ. .... 49
- FIGURA 2:** VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES. LETRAS IGUAIS, NA LINHA, INDICAM QUE AS MÉDIAS NÃO DIFEREM AO NÍVEL DE 5 %. L1: CARRAZEDO TPA; L2: CARRAZEDO SOLO ADJACENTE; L3: AEROPORTO SOLO ADJACENTE; L4: GURUPÁ IGREJA TPA; L5: GURUPÁ VILA VELHA TPA; L6: GURUPÁ VILA NOVA TPA; L7: MARIA RIBEIRA TPA; L8: MARIA RIBEIRA SOLO ADJACENTE. .... 54
- Figura 3:** VALORES MÉDIOS DE TRÊS REPETIÇÕES. LETRAS IGUAIS, NA LINHA, INDICAM QUE AS MÉDIAS NÃO DIFEREM AO NÍVEL DE 5 %. L1: CARRAZEDO TPA; L2: CARRAZEDO SOLO ADJACENTE; L3: AEROPORTO SOLO ADJACENTE; L4: GURUPÁ IGREJA TPA; L5: GURUPÁ VILA VELHA TPA; L6: GURUPÁ VILA NOVA TPA; L7: MARIA RIBEIRA TPA; L8: MARIA RIBEIRA SOLO ADJACENTE..... 55
- FIGURA 4:** DADOS DE MINERALOGIA DO PERFIL NO SITIO ARQUEOLÓGICO GURUPÁ MIRI - VILA VELHA..... 56
- FIGURA 5:** DADOS DE MINERALOGIA DO PERFIL NO SITIO ARQUEOLÓGICO CARRAZEDO..... 57
- Figura 6:** Dados de mineralogia do perfil no sítio arqueológico Gurupá - Igreja..... 57



## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1:</b> PONTOS DE COLETAS NO MUNICÍPIO DE GURUPÁ, ESTADO DO PARÁ. ....	50
<b>TABELA 2:</b> DADOS DE ESTABILIDADE DE AGREGADOS EM 8 LOCALIDADES DE COLETA NO MUNICÍPIO DE GURUPÁ-PA .....	53
<b>TABELA 3:</b> DADOS DE ANÁLISE QUÍMICA DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA NO MUNICÍPIO DE GURUPÁ-PA.....	56

## Sumário

<b>1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>11</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>19</b>
2.1 Povos antigos da Amazônia .....	19
2.2 Solos antrópicos da Amazônia .....	20
2.3 Solos antrópicos em Gurupá-PA e adjacências .....	21
2.4 Mineralogia dos solos amazônicos .....	22
2.5 Matéria orgânica dos solos de terra preta arqueológicas .....	24
2.6 Propriedades físico-químico de solo em terra preta arqueológicas .....	25
2.6.1 Estabilidade de agregado do solo .....	25
2.6.2 Estoque de carbono .....	26
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>27</b>
<b>3. METODOLOGIA DE QUEIMA DA MATÉRIA ORGÂNICA PARA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA EM SOLOS DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA NA AMAZÔNIA.....</b>	<b>32</b>
3.1 Introdução.....	32
3.2 Material e Métodos .....	34
3.2.1 Áreas de estudo .....	34
3.2.2 Amostragem do solo.....	35
3.2.3 Remoção da MO pelo método da oxidação.....	36
3.2.4 Remoção da MO pelo gravimetria por incineração em mufla .....	36
3.2.5 Estatística .....	37
3.3 Resultados .....	37
3.3.1 Distribuição do tamanho das partículas após remoção da MO pelo método por oxidação..	37
3.3.2 Teste termogravimétrico .....	41
3.4 Discussão .....	42
3.4.1 Distribuição do tamanho das partículas após remoção da MO pelo método por oxidação..	42
3.4.2 Teste termogravimétrico .....	43
3.5 Conclusão .....	44
3.6 Referências .....	44
<b>4. CARACTERIZAÇÃO DAS TERRAS PRETAS ARQUEOLÓGICAS NO MUNICÍPIO DE GURUPÁ-PA.....</b>	<b>47</b>
4.1 Introdução.....	47
4.2 Material e métodos.....	49

4.2.1	Localização .....	49
4.3.1	Estabilidade de agregado do solo .....	50
4.3.2	Densidade do solo .....	51
4.3.3	Análise química.....	51
4.3.4	Carbono orgânico total e estoque de carbono.....	51
4.3.5	Análises mineralógicas.....	52
4.3.6	Estatística .....	52
<b>4.4</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>53</b>
4.4.1	Distribuição de agregados .....	53
4.4.2	Atributo mineralógico da fração argila .....	57
<b>4.5</b>	<b>Discursão.....</b>	<b>59</b>
4.5.1	Distribuição dos agregados e sua relação com o carbono orgânico .....	59
4.5.2	Relação entre carbono orgânico e nutrientes do solo .....	59
4.5.3	Mineralogia da fração argila .....	60
<b>4.6</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>60</b>
<b>4.7</b>	<b>Referências .....</b>	<b>61</b>

## 1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Na região amazônica, os solos antropogênicos são férteis, conhecidos como Terra Preta Arqueológica (TPA), e são resultados de profundas modificações provocadas pelas atividades humanas, incluindo a adição de material orgânico ou lixo doméstico, estes estão embutidos em uma paisagem de solos altamente intemperizados, identificados como os Latossolos (ARROYO-KALIN, 2017a; GLASER et al., 2001), mas também pode ocorrer em outras ordens de solos como nos Argissolos e Neossolos, com manchas descontínuas pela região amazônica (BROWNE RIBEIRO et al., 2016; SCHULTZ et al., 1999)

O município de Gurupá tem predominância de Latossolo Amarelo Distrófico e a margem do rio é classificado como Gleissolo Háptico Eutrófico (IBGE, 2018), a cidade fica localizada em um ponto estratégico particularmente para destacar as transições das formas indígenas e europeias de habitação e uso da terra e descobertas de sítios arqueológicos do período pré-colonial e colonial (LIMA et al., 2020).

Os solos de TPA são formados por diversos fatores e por um longo período de tempo, e um dos fatores importantes é o clima equatorial quente e úmido da região amazônica que por consequência chega a promover altas taxas de decomposição, principalmente em resíduos orgânicos. Os locais de terra preta podem variar de 0,1 a 90 hectares (ha) em tamanho, chegando a centenas de hectares em áreas próximas a rios (BATISTÃO et al., 2020; COSTA et al., 2017; COSTA; LIMA DA COSTA; KERN, 2013; KERN et al., 2009). (KERN; DE LP RUIVO; FRAZÃO, 2009).

Esses solos constituem uma linha de base importante para o estudo de assentamentos indígenas antigos, uma vez que indicam a localização das áreas funcionais das aldeias, devido às propriedades muito distintas de seu horizonte de ocupação (COSTA et al., 2004; LIMA et al., 2002).

Geralmente de caráter eutrófico, TPA são solos com altos níveis de nutrientes de forma assimilada pelas plantas, principalmente cálcio (Ca) e fósforo (P), e outros elementos presentes no solo como, Mg, Mn, Zn, Cu, C orgânico e presença de fragmentos de cerâmica e partículas de carvão, em comparação com os solos adjacentes predominantes (COSTA et al., 2017; GLASER; BIRK, 2012).

Fisicamente e quimicamente, em solo terra preta ocorrem grandes transformações, sendo que o horizonte A é visivelmente mais escuro e espesso e essas características revelam um nível alto de matéria orgânica que se estabilizou nessa camada. Os estudos de química do solo expandem a compreensão das propriedades físico-química das TPA, que em geral

apresentam um pH mais básico, uma maior capacidade de troca catiônica, alta saturação de bases, e melhor estabilidade de agregado, quando comparadas com solos adjacentes (ARROYO-KALIN, 2017b).

A terra preta arqueológica podem servir de modelo para a agricultura sustentável nos trópicos úmidos (GLASER, 2007; GLASER et al., 2001; SOMBROEK et al., 2003) e para outros solos que exibem baixa capacidade de retenção de nutrientes. Técnicas agrícolas ou agroflorestais, bem como o manejo de resíduos e plantas, que levam à formação de terra preta têm o potencial reduzir a taxa de degradação do solo da agricultura intensiva empregada recentemente nessas regiões e recuperar áreas degradadas (GLASER; BIRK, 2012).

Um dos fatores importantes na TPA é a matéria orgânica do solo, pois, desempenha um papel fundamental na formação da estrutura física do solo, principalmente através da formação de complexos organominerais que determinam o arranjo e a estabilidade dos agregados do solo (MIKUTTA et al., 2006).

Uma das características mais importantes da matéria orgânica do solo (MOS) é sua capacidade de cimentação. Os agregados podem ser encontrados em diferentes tamanhos e graus, incluindo a fração orgânica, que é essencialmente composta de resíduos de plantas (isto é, partículas maiores com menor grau de degradação); a fração mineral, formada principalmente por partículas mais densas do solo; e, finalmente, as frações organominerais, que podem ser divididas entre microagregados do solo que atuam como um agente ligante (chamado fração ocluída) ou como uma fração recalcitrante, principalmente ligada à fração argila do solo (DURIGAN et al., 2017).

A interação da MOS com seus componentes minerais é um processo importante a ser compreendido, porque solos de regiões tropicais situados em ambientes de clima quente e úmido apresentam conteúdos de matéria orgânica (MO) semelhantes a solos desenvolvidos em regiões temperadas (BAYER, C.; MIELNIC ZUK, 2008). Neste contexto, torna-se de suma importância investigar não só a MO, mas também a sua mineralogia, os atributos químicos e físicos do solo de TPA – que configuram o objetivo maior deste trabalho.

Estudos realizados em solos de TPA, em sua maioria deram maior destaque aos atributos químicos, principalmente aqueles ligados a fertilidade desses solos, e aos atributos físicos, sendo com menor frequência encontrado trabalhos com estudos mineralógicos. Estudos avaliando a composição mineralógica dos solos de TPA mais recentes foram conduzidos por (LEMOS et al., 2011; MACEDO, 2014; SANTOS, 2018) e os que se referem aos solos de terras mulatas são ainda mais escassos.

A distribuição atualmente conhecida dos locais da TPA está concentrada em áreas relativamente acessíveis no topo dos terraços na maior parte das vezes ao longo das principais vias navegáveis da bacia hidrográfica da Amazônia e ao redor de centros populacionais atuais, como a cidade de Santarém, onde a TPA foi originalmente descrita (SOMBROEK, 1966). No entanto, apesar do aumento da intensidade na pesquisa da TPA na última década, é necessário desenvolver abordagens eficientes para o mapeamento e análise do solo para documentar e entender sua formação (ARAÚJO et al., 2015).

Silva et al. (2021), destacam novos estudos para desenvolver novas evidências de locais de TPA, alguns vestígios como: carvão, artefatos arqueológicos, vestígios de fezes humanas e a própria gênese mostra que os povos pré-colombianos habitavam na área. Ainda de acordo com o autor grandes populações sedentárias teriam que manejar os solos milhares de anos antes, para o surgimento de um solo com grandes características férteis, com isso, possivelmente, os povos indígenas usaram seus conhecimentos para identificar e habitar preferencialmente áreas de solo fértil antes do início do uso intensivo da terra na Amazônia central. No entanto, pesquisas geoarqueológicas nesta mesma região, assim como em outras partes da Amazônia, demonstram claramente que foram processos antrópicos – humanos - que levaram à formação das TPA em sua gênese e manutenção (SCHMIDT et al. 2014).

Dos avanços nas pesquisas sobre as TPA, e também dos debates em torno da sua formação e evolução, fica clara a grande variabilidade interna deste solo, entre as diferentes regiões. Neste sentido, acreditamos que uma caracterização detalhada de sítios pré- e pós-coloniais existentes no arquipélago do Marajó, vem a contribuir com novos dados sobre seu comportamento físico e características mineralógicas.

## REFERÊNCIAS

- ABIVEN, S.; MENASSERI, S.; CHENU, C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 1, p. 1–12, 2009.
- ABRAR, M. M. et al. Variations in the profile distribution and protection mechanisms of organic carbon under long-term fertilization in a Chinese Mollisol. **Science of the Total Environment**, v. 723, n?, p. 138181, 2020.
- ALLEGRETTA, I. et al. The effect of temper on the thermal conductivity of traditional ceramics: Nature, percentage and granulometry. **Thermochimica Acta**, v. 581, p. 100–109, 2014.
- AN, S. et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. **Catena**, v. 81, n. 3, p. 226–233, 2010.

ARAÚJO, S. R. et al. Determining soil properties in Amazonian Dark Earths by reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v. 237, n<sup>o</sup>, p. 308–317, 2015.

ARROYO-KALIN, M. Las tierras antrópicas amazónicas: algo más que un puñado de tierra. **Las Siete Maravillas de la Amazonía precolombina**, v?, n. October, p. 99–117, 2017a.

ARROYO-KALIN, M. Las Siete Maravillas de la Amazonía precolombina. In: BETANCOURT, S. R. AND C. J. (Ed.). **Las tierras antrópicas amazónicas: algo más que un puñado de tierra**. La Paz: [s.n.]. p. 99–117. ano?

BARROS, T. R. M. et al. Distribution of textural and structural porosity in soils of Archaeological Dark Earth. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n?, p. 609–615, 2016.

BATISTÃO, A. C. et al. Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil. **Geoderma**, v. 363, n. July 2019, p. 114130, 2020.

BAYER, C. & MIELNIC ZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F. A. . (Ed.). . **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: [s.n.]. p. 7–18.

BERNARDES, K. C. et al. Chemical attributes of archaeological black earth soils in Brazilian Amazon. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 10, p. 1334–1338, 2017.

BERNEDO, A. V. B.; LATINI, R. M. Cerâmicas arqueológicas brasileiras: uma revisão de estudos arqueométricos em sítios arqueológicos do Acre, bacia Amazônica e da Região dos Lagos, Rio de Janeiro. **Geochimica Brasiliensis**, v. 27, n. 2, p. 140–151, 2013.

BOIVIN, N. L. et al. Ecological consequences of human niche construction: Examining long-term anthropogenic shaping of global species distributions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 113, n. 23, p. 6388–6396, 2016.

BOKHORST, S. et al. Climate change effects on organic matter decomposition rates in ecosystems from the Maritime Antarctic and Falkland Islands. **Global Change Biology**, v. 13, n. 12, p. 2642–2653, 2007.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Matéria Orgânica do Solo. In: **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. [s.l: s.n.]. p. 398.

BRAIDA, J. A. et al. Matéria Orgânica E Seu Efeito Na Física Do Solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 7, p. 221–278, 2011.

BROWNE RIBEIRO, A. T. et al. Results from Pilot Archaeological Fieldwork at the Carrazedo Site, Lower Xingu River, Amazonia. **Latin American Antiquity**, v. 27, n. 3, p. 318–339, 2016.

CALDERÓN, F. J. et al. Chemical Differences in Soil Organic Matter Fractions Determined by Diffuse-Reflectance Mid-Infrared Spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n. 2, p. 568–579, 2011.

CAMPOS, M. C. C. et al. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 598–609, 2011.

CHAPLOT, V.; COOPER, M. Soil aggregate stability to predict organic carbon outputs from soils. **Geoderma**, v. 243–244, p. 205–213, 2015.

CLEMENT, C. R. et al. The domestication of amazonia before european conquest. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 282, n. 1812, 2015.

CONSUELO, G. et al. Koriabo. Baixo Amazonas. Xingu. 2018.

COSTA, A. DA R. et al. Forms of soil organic phosphorus at black earth sites in the Eastern Amazon. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 48, n. 1, p. 1–12, 2017.

COSTA, M. L. DA et al. The ceramic artifacts in archaeological black earth (terra preta) from Lower Amazon Region, Brazil: chemistry and geochemical evolution. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 3, p. 375–386, 2004.

COSTA, J. A.; LIMA DA COSTA, M.; KERN, D. C. Analysis of the spatial distribution of geochemical signatures for the identification of prehistoric settlement patterns in ADE and TMA sites in the lower Amazon Basin. **Journal of Archaeological Science**, v. 40, n. 6, p. 2771–2782, 2013.

CUNHA, T. J. F. et al. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte a antrópico da amazônia (Terra Preta). **Acta Amazonica**, v. 37, n. 1, p. 91–98, 2007.

DA COSTA, M. L. et al. Mineralogia e química de fragmentos cerâmicos arqueológicos em sítio com Terra Preta da Amazônia Colombiana. **Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 1, p. 17–23, 2011.

DA SILVA, A. K. T. et al. Mineralogia e geoquímica de perfis de solo com terra preta arqueológica de Bom Jesus do tocantins, sudeste da Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 4, p. 477–490, 2012.

DA SILVA, D. M. P. et al. Spatial variability of soil properties in archeological Dark Earth sites under cacao cultivation. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 40, p. 1–12, 2016. n?

DEVIREN SAYGIN, S. et al. Comparison of different aggregate stability approaches for loamy sand soils. **Applied Soil Ecology**, v. 54, p. 1–6, 2012.

DONAGEMMA, G. K. et al. Análise granulométrica. In: **Manual de métodos de análise de solo**. p. 437, 2017.

DURIGAN, M. R. et al. Soil organic matter responses to anthropogenic forest disturbance and land use change in the eastern Brazilian Amazon. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 3, 2017.

EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. Dispersion of Soil Particles By Sonic Vibration. **Journal of Soil Science**, v. 18, n. 1, p. 47–63, 1967.

FERREIRA, B. A. et al. Óxidos de ferro das frações areia e silte de Um nitossolo desenvolvido de basalto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 27, p. 405–413, 2003. n?

FONTANA, A. MATÉRIA ORGÂNICA. In: **Manual de métodos de análise de solo**. p. 397, 2017.



- GEE, G.W.; BAUDER, J. . Particle-size analysis. In: **Methods of soil analysis**. [s.l: s.n.]. p. 383–411.
- GLASER, B. et al. The “Terra Preta” phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, n. 1, p. 37–41, 2001.
- GLASER, B. Prehistorically modified soils of central Amazonia: A model for sustainable agriculture in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 362, n. 1478, p. 187–196, 2007.
- 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**, v. 82, p. 39–51, 2012.
- HAGHVERDI, A.; ÖZTÜRK, H. S.; DURNER, W. Measurement and estimation of the soil water retention curve using the evaporation method and the pseudo continuous pedotransfer function. **Journal of Hydrology**, v. 563, n. June, p. 251–259, 2018.
- HOBLEY, E. et al. Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia. **Plant and Soil**, v. 390, n. 1–2, p. 111–127, 2015.
- HORNBORG, A. Ethnogenesis, regional integration, and ecology in prehistoric Amazonia: Toward a system perspective. **Current Anthropology**, v. 46, n. 4, p. 589–620, 2005.
- HOWARD, P. J. A.; HOWARD, D. M. Use of organic carbon and loss-on-ignition to estimate soil organic matter in different soil types and horizons. **Biology and Fertility of Soils**, v. 9, n. 4, p. 306–310, 1990.
- KÄMPF, N.; KERN, D. . O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. **Tópico em Ciência do Solo**, n. 2, p. 277–320, 2005.
- KAMPF, N.; MARQUES, J. J.; CURI, N. Mineralogia de solos Brasileiros. In: KER, J. C. et al. (Eds.). . **Pedologia: fundamentos**. [s.l: s.n.]. p. 81–145.
- KERN, D. C. et al. Evolução do conhecimento em Terra Preta de Índio. In: TEIXEIRA, W. G. et al. (Eds.). . **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. [s.l: s.n.]. p. 72–81.
- KERN, D. C. et al. Terras pretas: Approaches to formation processes in a new paradigm. **Geoarchaeology**, v. 32, n. 6, p. 694–706, 2017.
- KERN, D. C.; DE LP RUIVO, M.; FRAZÃO, F. J. L. Terra preta nova: The dream of wim sombroek. **Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek’s Vision**, p. 339–349, 2009.
- KETTERINGS, Q. M.; BIGHAM, J. M.; LAPERCHE, V. Changes in Soil Mineralogy and Texture Caused by Slash-and-Burn Fires in Sumatra, Indonesia. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 3, p. 1108–1117, 2000.
- KÖGEL-KNABNER, I.; AMELUNG, W. Soil organic matter in major pedogenic soil groups. **Geoderma**, v. 384, n. March 2020, 2021.
- KORCHAGIN, J. et al. Evidences of soil geochemistry and mineralogy changes caused by

eucalyptus rhizosphere. **Catena**, v. 175, n. June 2018, p. 132–143, 2019.

KOVEN, C. D. et al. The effect of vertically resolved soil biogeochemistry and alternate soil C and N models on C dynamics of CLM4. **Biogeosciences**, v. 10, n. 11, p. 7109–7131, 2013.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623–1627, 2004.

LAL, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology**, v. 24, n. 8, p. 3285–3301, 2018.

LAVKULICH, L. M.; WIENS, J. H. Division s-3—soil microbiology and biochemistry. p. 3–6, 1970.

LEMOS, V. P. et al. Nutrients in Amazonian black earth from Caxiuanã region. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 22, n. 4, p. 772–779, 2011.

LEVIS, C. et al. How people domesticated Amazonian forests. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 5, n. JAN, 2018.

LI, M. et al. Profile stock of soil organic carbon and distribution in croplands of Northeast China. **Catena**, v. 174, n. November 2018, p. 285–292, 2019.

LIMA, H. N. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**. [s.l: s.n.].

LIMA, H. N. et al. Características Químicas e Mineralógicas e a Distribuição de Fontes de Fósforo em Terras Pretas de Índio da Amazônia Ocidental Material e Métodos. 2002.

LIMA, H. N. et al. Mineralogia e química de três solos de uma topossequência da bacia sedimentar do Alto Solimões, Amazônia ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 59–68, 2006.

LIMA, H. P. et al. Oca, origens, cultura e ambiente. **Revista Arqueologia Pública**, v. 14, n. 1, p. 96–128, 2020.

LIMA, H. P.; MORAES, B. Arqueologia e comunidades tradicionais na Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 65, n. 2, p. 39–42, 2013.

LOPES, P. R. D. C. et al. ANÁLISE GEOAMBIENTAL DE SÍTIOS ARQUEOLÓGICOS NO ESTUÁRIO DO RIO PARÁ, AMAZÔNIA\*. **Habitus**, v. 17, p. 557–575, 2019.

MACEDO, R. S. **Pedogênese e indicadores pedoarqueológicos em Terra Preta de Índio no município de Iranduba - AM**. Piracicaba: [s.n.].

MACHADO, J. S. Dos artefatos às aldeias: Os vestígios arqueológicos no entendimento das formas de organização social da Amazônia. **Revista de Antropologia**, v. 49, n. 2, p. 755–786, 2006.

MADARI, B. E. et al. As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. In: **Matéria orgânica dos solos Antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): suas características e papel na sustentabilidade da**

**fertilidade do solo.** [s.l: s.n.].

MCLEAN, W. The Nature of Soil Organic Matter as Shown by the attack of Hydrogen Peroxide. **The Journal of Agricultural Science**, v. 21, n. 4, p. 595–611, 1931.

MIKHA, M. M.; RICE, C. W. DIVISION S-3-SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY Tillage and Manure Effects on Soil and Aggregate-Associated Carbon and Nitrogen. n. 3, p. 809–816, 2004.

MIKUTTA, R. et al. Review: Organic matter removal from soils using hydrogen peroxide, sodium hypochlorite, and disodium peroxodisulfate. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 1, p. 120–135, 2005.

NEVES, E. G. et al. HISTORICAL AND SOCIO-CULTURAL ORIGINS OF AMAZONIAN DARK EARTHS. In: **Amazonian Dark Earths : Origin, Properties e management.** [s.l: s.n.]. p. 29–51.

NÓBREGA, G. N. et al. Evaluation of methods for quantifying organic carbon in mangrove soils from semi-arid region. **Journal of Soils and Sediments**, v. 15, n. 2, p. 282–291, 2015.

NUNES, K. P. et al. Preliminary compositional evidence of provenance of ceramics from Hatahara archaeological site, central Amazonia. **Journal of Chemistry**, v. 2013, 2013.

PARIKH, S. J. et al. **Soil chemical insights provided through vibrational spectroscopy.** [s.l.] Elsevier, 2014. v. 126

PEREIRA, M. G. et al. Granulometric and humic fractions carbon stocks of soil organic matter under no-tillage system in Uberaba, Brazil. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 15, n. 1, p. 1–13, 2012.

RAHMATI, O. et al. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. **Geomorphology**, v. 298, p. 118–137, 2017.

RESENDE, M. et al. **Mineralogia de Solos Brasileiros: Interpretação e Aplicações.** Lavras-MG: [s.n.].

RIVERA, J. I.; BONILLA, C. A. Predicting soil aggregate stability using readily available soil properties and machine learning techniques. **Catena**, v. 187, n. April 2019, p. 104408, 2020.

ROBINSON, G. W. Note on the mechanical analysis of humus soils. **The Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 3, p. 287–291, 1922.

SANTOS, L. A. C. DOS. **MINERALOGIA E MATÉRIA ORGÂNICA DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA E SOLOS ADJACENTES NÃO ANTRÓPICOS NA REGIÃO DO APUÍ AMAZONAS.** Santa Maria – RS: [s.n.].

SCHARLEMANN, J. P. W. et al. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. **Carbon Management**, v. 5, n. 1, p. 81–91, 2014.

SCHELLEKENS, J. et al. Molecular composition of several soil organic matter fractions from anthropogenic black soils (Terra Preta de Índio) in Amazonia — A pyrolysis-GC/MS study. **Geoderma**, v. 288, p. 154–165, 2017.

- SCHMIDT, M. J. et al. Dark earths and the human built landscape in Amazonia: A widespread pattern of anthrosol formation. **Journal of Archaeological Science**, v. 42, n. 1, p. 152–165, 2014.
- SCHULTE, E. E.; HOPKINS, B. G. Estimation of Soil Organic Matter by Weight Loss-On-Ignition. v. 049, n. 46, p. 21–31, 2015.
- SCHULTZ, M. K. et al. Optimizing the removal of carbon phases in soils and sediments for sequential chemical extractions by coulometry. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 1, n. 2, p. 183–190, 1999.
- SHAHBAZ, M.; KUZYAKOV, Y.; HEITKAMP, F. Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: Mechanisms and controls. **Geoderma**, v. 304, p. 76–82, 2017.
- SHI, Z. et al. Model structures amplify uncertainty in predicted soil carbon responses to climate change. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1–11, 2018.
- SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, p. 7–31, 2004.
- SOARES, M. D. R. et al. Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **GAIA SCIENTIA**, v. 12, p. 125–133, 2018.
- SOMBROEK, W. G. et al. Amazonian Dark Earth as carbon stores and sinks. In: J. LEHMANN, D. KERN, B. G. & W. W. (Ed.). . **Amazonian Dark Earths: origin, properties, and management**. [s.l: s.n.]. p. 125–139.
- SOUSA, M. A. et al. Atributos químicos e frações da matéria orgânica em solos antrópicos na Amazônia Oriental. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 29623–29643, 2020.
- STAHL, P. W. The contributions of zooarchaeology to historical ecology in the neotropics. **Quaternary International**, v. 180, n. 1, p. 5–16, 2008.
- STERGIADI, M. et al. Effects of climate change and land management on soil organic carbon dynamics and carbon leaching in Northwestern Europe. **Biogeosciences Discussions**, v. 12, n. 23, p. 19627–19671, 2015.
- TAYLOR, U. S. R. M. Iron Oxides. In: WEED, J. B. D. S. B. (Ed.). . **Minerals in Soil Environments**. [s.l: s.n.].
- TEIXEIRA, W. G. E; MARTINS, G. C. SOIL PHYSICAL CHARACTERIZATION. In: **Amazonian Dark Earths : Origin, Properties e management**. [s.l: s.n.]. p. 271–285.
- ULERY, A. L.; GRAHAM, R. C. Forest Fire Effects on Soil Color and Texture. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, n. 1, p. 135–140, 1993.
- WIESMEIER, M. et al. Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth. **Global Change Biology**, v. 18, n. 7, p. 2233–2245, 2012.
- WRIGHT, A. L.; WANG, Y.; REDDY, K. R. Loss-on-ignition method to assess soil organic

carbon in calcareous Everglades wetlands. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 39, n. 19–20, p. 3074–3083, 2008.

XIAO, H. et al. Developing equations to explore relationships between aggregate stability and erodibility in Ultisols of subtropical China. **Catena**, v. 157, n. 26, p. 279–285, 2017.

XU, X.; THORNTON, P. E.; POST, W. M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. **Global Ecology and Biogeography**, v. 22, n. 6, p. 737–749, 2013.

YEASMIN, S. et al. Evaluation of pre-treatment procedures for improved interpretation of mid infrared spectra of soil organic matter. **Geoderma**, v. 304, n. 2015, p. 83–92, 2017.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Povos antigos da Amazônia**

As primeiras ocupações humanas na Amazônia se deram no período de aproximadamente 12.000 a 8.500 anos antes do presente (AP) e incluíam diversas sociedades forrageadoras de florestas tropicais. A ocupação humana e domesticação de espécies na Amazônia desenvolveram-se em um período final do Pleistoceno e em todo período Holoceno. A domesticação é um processo a longo prazo no qual a seleção natural interage com a seleção humana, levando mudanças na atividade humana da paisagem. Vestígios dessas sociedades antigas na Amazônia podem ser encontrados na arte rupestre, nos artefatos em rochas (líticos), acúmulos de conchas (sambaquis) e, a partir de 7.000 anos, também nos fragmentos de cerâmicas (CLEMENT et al., 2015).

Este processo de domesticação ou de criação de paisagens, durante o Holoceno inferior e médio, é explicado por Clement (et al., 2015), como pequenas sociedades que praticavam alguns plantios casuais, mas que alteravam substancialmente a composição da área, devido as diversas atividades entorno das vilas e assentamentos e por meio de interações não intencionais ocorriam mudança ecológicas e ambientais, já o Holoceno superior ocorrem mudança mais substanciais, com horticultura doméstica e manejo em larga escala, sendo que alguns grupos desenvolveram uma agricultura extensiva de corte e queima e estratégia semi-intensiva.

De acordo com Kämpf e Kern (2005), evidências arqueológicas indicam que atividades humanas antigas nos habitats amazônicos transformaram significativamente as paisagens no entorno dos assentamentos, notadamente no pré-colonial tardio. Ainda de acordo com os autores, as ocupações pelos povos indígenas pré-colonial favoreceram modificações tanto em ambientes de várzeas como de terra firme.

As pesquisas arqueológicas sugerem que as terras pretas resultam de habitação humana prolongada, servindo também como fonte de evidências para o entendimento do manejo do solo e das atividades diárias (BROWNE RIBEIRO et al., 2016; KERN et al., 2017). As atividades humanas passadas na formação das TPA são amplamente aceitas na comunidade científica. Como sítios de assentamentos antigos, as terras pretas também são resquícios de atividades realizadas pelos antigos habitantes da Amazônia. Corroborando com a pesquisa de Silva et al. (2021), que destaca a existência de manchas pequenas e dispersas de TPA na Amazônia é frequentemente atribuída a comunidades transitórias contendo poucas pessoas durante muito tempo, e/ou acredita-se que manchas maiores de TPA tenham sido criadas por pessoas que vivem em grandes aldeias sedentárias.

Em decorrência da expansão de áreas habitadas, a biodiversidade, geralmente atribuída a padrões de clima, relevo e solos, está associada também, pelo menos em parte, com culturas humanas, vestígios culturais e solos antrópicos. Ao longo de todo o Holoceno os humanos podem ter atuado como vetores primários de dispersão de longa distância de sementes e plantas mesmo que intencionalmente (BOIVIN et al., 2016; LEVIS et al., 2018).

Sendo assim, pesquisas apontam que as populações pré-coloniais tiveram um papel importante na formação de determinadas paisagens e seus efeitos passados que contribuem para os padrões da paisagem atual (HORNBERG, 2005). Entretanto, esses efeitos podem ser caracterizados pela mudança na abundância de comunidade florestal, expansão ou diminuição da abrangência de espécies, criação de oportunidades para a invasão de espécies de plantas, alteração dos nutrientes do solo e alteração do mosaico da paisagem (STAHL, 2008).

Evidências apontam que entre 4.500 e 2.000 AP, ao longo das principais várzeas da região Amazônica houve estabelecimento de numerosas aldeias permanentes ocupando os terraços elevados (KÄMPF; KERN, 2005). A presença de sociedades mais numerosas, com um aumento populacional e estabelecimento do sedentarismo e da agricultura datam de 2.500 anos AP. Nesse período ocorreram significativas intervenções antrópicas na paisagem, como a construção de tesos (grandes aterros que abrigavam aldeias e cemitérios indígenas pré-coloniais), e a formação das terras pretas arqueológicas (TPA) (NEVES et al., 2003).

De acordo com (LOPES et al., 2019), os processos antrópicos relacionavam-se ao uso das áreas ao longo do tempo, os impactos provocados pelas ocupações pré-coloniais foram provavelmente menos agressivos ao ecossistema, apesar das alterações ambientais, com a implantação das vilas, preparação dos roçados, manejo vegetal, entre outros.

## **2.2 Solos antrópicos da Amazônia**

Os solos antrópicos na Amazônia estão distribuídos em praticamente todas as ecorregiões. Apresentam características bióticas e abióticas diferenciadas e normalmente coincidem com os grandes interflúvios. A grande maioria dos solos de terra preta estão localizados em sítios arqueológicos e em margens de rios, cursos de água, ocupando várzeas, elevações marginais adjacentes e terra firme interior com extensões de menos de um hectare disseminando solos de terra firme (ARROYO-KALIN, 2017a; KERN et al., 2017).

Estudos de TPA mostram que propriedades físico-química e geoquímicas desses solos são alterados, devido a uma densidade de fragmentos de cerâmicas, argila queimada, ossos, carvão e marcadores lipídicos (ARROYO-KALIN, 2017b).

Na região amazônica as terras pretas arqueológicas (TPA) correspondem a manchas de solos altamente férteis, com amplitude de cores e grande variabilidade. As TPA são caracterizadas por um alto teor de nutrientes como Fósforo (P), Cálcio (Ca) e Manganês (Mn) e Matéria orgânica (MO), e são formadas pela entrada de material inorgânico (cinzas, ossos de peixes) e orgânico (resíduos orgânicos, carvão vegetal) (GLASER; BIRK, 2012; SCHELLEKENS et al., 2017; SOMBROEK et al., 2003). Diferente da grande parte dos solos amazônicos que são observados com ampla expressão solos que apresentam um elevado grau de intemperismo, e em função deste, baixa fertilidade natural e elevados valores de acidez (SOUSA et al., 2020).

Esses solos de horizonte A são encontrados em espessura que atingem entre 10 cm e 200 cm de profundidade e centenas de hectares de largura, estes solos são o resultado da ação de centenas de anos de processos pedogenéticos em superfície, são terras enriquecidas pelas práticas habitacionais das sociedades amazônicas pré-colombianas não intencional (KERN; DE LP RUIVO; FRAZÃO, 2009). De modo geral são bem drenados, com textura variando de arenosa a muito argilosa, pode ser encontrada em vários tipos de solo, como Latossolo, Argissolo, Luvisolo, Neossolo e Cambissolo (SCHULTZ et al., 1999).

Os solos da Amazônia são geralmente ácidos e com baixa disponibilidade de nutrientes, principalmente fósforo. No entanto, no mesmo ambiente, existem manchas de solos escuros com elevados valores de matéria orgânica e nutriente (BERNARDES et al., 2017; SCHMIDT et al., 2014).

Em função da elevada fertilidade das TPA, estes são muito utilizados para práticas agrícolas por pequenos produtores e comunidades tradicionais, principalmente para cultivos de subsistência, tais como mandioca, banana, milho, mamão, substrato para a horticultura doméstica, agricultura de corte e queimada ou mesmo monocultura intensiva. Pois, devido à riqueza desses solos, os produtores conseguem manter rendimentos mais altos, além de requerer menor esforço para a preparação da área, o que no fim do século XIX, já chamava a atenção de pesquisadores científicos (ARROYO-KALIN, 2017a; BARROS et al., 2016; SOARES et al., 2018).

### **2.3 Solos antrópicos em Gurupá-PA e adjacências**

O município de Gurupá se localiza no local onde o rio Xingu encontra o baixo rio Amazonas, e possui vários sítios arqueológicos observados através de sondagens realizadas devido aos relatos de numerosos e extensos locais pré-históricos de terra preta arqueológica (BROWNE RIBEIRO et al., 2016). Desta forma, Gurupá está particularmente bem localizada



para destacar as transições ou distinções entre as formas indígenas e europeias de habitação e uso da terra.

Estudos realizados por Lima; Moraes, (2013), mostram relatos da própria comunidade em um diálogo multivocal sobre a importância de contribuir para a construção do conhecimento arqueológico, a princípio pelos locais onde habitam, assentamentos, vilas, pequenas comunidades que recorrentemente se encontram sobre os sítios arqueológicos. Contudo, ainda de acordo com os autores a forma organizacional dos povos mostram uma compreensão mais expansiva da interação entre comunidade e vestígios em um processo de entendimento da formação contínua dos sítios arqueológicos (LIMA et al. 2020).

Carrazedo e Gurupá Miri, alvos do presente estudo, são comunidades tradicionais quilombolas que ocupam sítios pré-coloniais de terra preta, praticam o manejo de recursos agro extrativos e se destacam devidos as escavações dos sítios arqueológicos. A comunidade de Carrazedo se desenvolveu no início do período histórico-colonial localizada no topo de um extenso local de terra preta, além de que as escavações investigaram duas áreas: uma delas, denominada “Terraço”, possui um componente pré-colonial composto por montículos, plataformas e caminhos em uma matriz profunda e extensa de TPA e inúmeros artefatos; e a outra, denominada “Vila Antiga”, situa-se na porção do sítio caracterizada por restos edificadas de uma ocupação moderna de até cerca 1960 e onde se concentram também os vestígios da cidade colonial e TPA (terra preta arqueológica) (FERNANDES et al., 2018).

## **2.4 Mineralogia dos solos amazônicos**

A difratometria de raios-X é a principal técnica para identificação de compostos cristalinos, particularmente válida quando há mais de uma fase cristalina (mais de um mineral), situação comum nos solos (RESENDE et al., 2011). O conhecimento da composição mineralógica do solo permite avaliar sua riqueza em reserva mineral, sendo importante para estimativa da fertilidade. Os solos tropicais apresentam um longo e profundo grau de intemperismo, predominando uma surpreendente variação nas características químicas e mineralógicas, principalmente em minerais silicatados do tipo 1:1 na fração argila e óxidos de ferro e de alumínio (FERREIRA et al., 2003; LIMA et al., 2006).

De acordo com Ferreira et al (2003), os óxidos de ferro mais comumente encontrados nos solos brasileiros são hematita, goethita, maghemita, magnetita e ilmenita. Hematita e goethita são, mais comumente, fases residuais de decomposição de silicatos, maghemita e magnetita podem ser herdadas diretamente do material de origem ou ser formadas ou alteradas durante a pedogênese, a ilmenita tende a ter origem litogênica. A origem pedogenética da

maghemita nos solos pode ocorrer a partir da oxidação da magnetita, ou a partir do aquecimento da lepidocrocita (TAYLOR, 1989).

No entanto, sua ocorrência também pode estar associada ao efeito do fogo, exigindo temperaturas próximas a 500 °C para sua formação. Por meio de transformações a partir de outros minerais na presença da matéria orgânica como agente redutor. Os estudos avançaram bastante a respeito sobre as TPA, e os estudos relacionados à mineralogia das TPA foram reportados por (DA SILVA et al., 2012; LIMA, 2001; MACEDO, 2014) e o mais recente (SANTOS, 2018).

De acordo com Lima (2001), não é comum observar grandes diferenças na composição mineralógica das frações argila das TPA e dos solos adjacentes, sendo a fração argila dominada por caulinita e predominando entre os óxidos, a goethita. A mineralogia dominante caulinítica em solos de Terras Pretas foi verificada por Macedo (2014), avaliando a pedogênese e indicadores pedoarqueológicos em TPA no município de Iranduba- AM. Segundo o autor, essa composição mineralógica já era esperada em virtude das condições climáticas amazônicas, as quais favorecem a lixiviação das bases trocáveis e da sílica do sistema, e favorece a formação e estabilização da caulinita (KAMPF; MARQUES; CURI, 2015).

Avaliando a mineralogia e geoquímica de perfis de solo com Terra Preta Arqueológica de Bom Jesus do Tocantins, no sudeste da Amazônia, Da Silva et al., (2012), observaram a presença de albita nos solos antrópicos, mineral que não faz parte da composição dos solos, no entanto foi encontrado no horizonte A antrópico, sendo proveniente dos artefatos cerâmicos.

Contribui ainda para a formação desses solos, o acúmulo de utensílios de cerâmica, que geralmente são encontrados como fragmentos. Os cacos representam partes de utensílios domésticos produzidos em argila com subsequentes calcinações e utilizados principalmente para o processamento, cozimento e armazenamento de alimentos (ALLEGRETTA et al., 2014; BERNEDO; LATINI, 2013; MACHADO, 2006)

Estudos mineralógicos e geoquímicos têm proporcionado contribuições cada vez mais importantes para o campo da arqueologia e esses estudos têm sido aplicados com sucesso na investigação dos fragmentos encontrados nos solos TPA (DA COSTA et al., 2011; NUNES et al., 2013). Os dados disponíveis sobre a mineralogia e composição química desses fragmentos revelam uma predominância de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , além dos baixos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  que são consistentes com altas concentrações de caulinita e quartzo e hematita/goethita e, como minerais acessórios; adicionalmente, baixos teores variáveis de K, Mg e Ca, entre outros, podem representar feldspatos, micas, feldspatos, etc. Em geral, a característica mais

proeminente desses fragmentos de sítios TPA é a presença de  $P_2O_5$  em níveis entre 0,5% e 12% (DA COSTA et al., 2011).

## 2.5 Matéria orgânica dos solos de terra preta arqueológicas

A matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica é caracterizada pelo alto teor de carbono orgânico nesses solos, devido um ambiente tropical úmido, são caracterizados por coloração preta a cinza acastanhada muito escura e pela presença de artefatos arqueológicos (fragmentos cerâmicos e / ou líticos, carvão, cascas) incorporados à matriz do solo (KÄMPF; KERN, 2005).

A coloração escura está relacionada a incorporação intensa e prolongada de C na forma de carbono pirogênico, o mesmo é resultado de combustão incompleta de resíduos vegetais e é composto principalmente de polissacarídeos, grupos carboxílicos, fenóis, amido, ésteres e alto teor de estruturas aromáticas (BATISTÃO et al., 2020; SANTOS, 2018; SCHELLEKENS et al., 2017). Seu alto teor de C associa às frações de ácido húmico e humina (CAMPOS et al., 2011) e persiste no solo por um longo período de tempo (KÄMPF; KERN, 2005), atuando na formação e estabilização de agregados (GLASER, 1999), e melhorando o aspecto físico do solo (CUNHA et al., 2007), proteção química por interações com a fase mineral (GLASER et al. al., 2003).

Entretanto, o aumento da temperatura global devido aos gases de efeito estufa e mudanças no uso da terra e manejo do solo podem elevar as taxas de mineralização da matéria orgânica, reduzindo os níveis de carbono do solo (BOKHORST et al., 2007; STERGIADI et al., 2015).

Visto que o carbono orgânico do solo (COS) é o maior reservatório de carbono (C) nos ecossistemas terrestres (LAL, 2018), pequenas mudanças no COS podem ter grandes impactos no solo, uma das variáveis importante e está relacionada diretamente ao COS é a biomassa microbiana do solo é um componente ativo da COS e sensível às mudanças ambientais (XU; THORNTON; POST, 2013). Suas variações espaciais e verticais podem influenciar bastante a mudança do COS. Existem grandes incertezas na previsão da mudança global do COS ao longo dos perfis do solo (KOVEN et al., 2013; SHI et al., 2018).

Alguns estudos demonstraram um efeito prejudicial das práticas de manejo nas propriedades físicas dos solos de terra preta. Por exemplo, (TEIXEIRA; MARTINS, 2003) estabeleceram que, além do menor teor de C, o diâmetro médio geométrico e a porcentagem de agregados maiores que 2 mm eram menores nos TPA usados para a produção de sementes em comparação aos TPA deixados em pousio. Além disso, a perda de carbono orgânico do solo

(COS) em TPA cultivados com cacau diminuiu a macroporosidade do solo, a porosidade total e o diâmetro médio dos agregados, e aumentou a densidade do solo e a resistência à penetração (DA SILVA et al., 2016).

## **2.6 Propriedades físico-químicas de solo em terra preta arqueológicas**

### **2.6.1 Estabilidade de agregado do solo**

O carbono orgânico do solo é o maior reservatório do ciclo global do carbono terrestre (Abdalla et al., 2018). Na verdade, os agregados do solo exercem um papel fundamental na manutenção da fertilidade do solo e de sua estrutura, protegendo fisicamente o COS da mineralização. Além disso, a estabilidade dos agregados do solo é um indicador significativo bem reconhecido de formação, degradação e estabilização da estrutura do solo (ABIVEN; MENASSERI; CHENU, 2009; ABRAR et al., 2020; SIX et al., 2004)

O solo é o principal componente dos ecossistemas terrestres e sua degradação leva a uma diminuição na capacidade do solo de fornecer serviços ecossistêmicos. Um dos indicadores mais importantes para a degradação do solo é a estabilidade de agregados (AN et al., 2010; DEVIREN SAYGIN et al., 2012)

A resistência dos agregados à decomposição afeta uma ampla gama de processos e propriedades do solo, como compactação do solo, estabilização da matéria orgânica do solo e proteção do carbono orgânico contra a erosão ou decomposição, estrutura da comunidade microbiana, adsorção de nutrientes, infiltração, condutividade hidráulica, aeração, desenvolvimento de raízes, sementes germinação, suscetibilidade do solo ao escoamento superficial e erosão entre sulcos e formação de crostas, estudos realizados recentes (CHAPLOT; COOPER, 2015; RIVERA; BONILLA, 2020; SHAHBAZ; KUZYAKOV; HEITKAMP, 2017).

De acordo com Chaplot; Cooper, (2015) e corroborado por (RIVERA; BONILLA, 2020), a presença de agregados estáveis na camada superficial do solo é crucial para manter a produtividade do solo, aumentando o sequestro de carbono, promovendo a ciclagem de nutrientes. Além disso, como a estabilidade de agregados é um fator crucial para a compreensão do potencial do solo, ela é usada como um preditor em modelos ambientais e rotinas de computador ao estimar a erosão do solo, sequestro de carbono orgânico, infiltração e retenção de água no solo (HAGHVERDI; ÖZTÜRK; DURNER, 2018; RAHMATI et al., 2017; XIAO et al., 2017).

### 2.6.2 Estoque de carbono

Está bem estabelecido que o COS total é um complexo que integra uma variedade de componentes, e que aumentar a quantidade de carbono sequestrado nesses componentes é essencial para mitigar sua conversão em gases de efeito estufa e as subsequentes mudanças climáticas (MIKHA; RICE, 2004). Nesse sentido, a agregação do solo é um dos principais processos que facilitam a preservação da COS e o sequestro de carbono (ABRAR et al., 2020; LAL, 2004; SIX et al., 2004).

O solo é o maior reservatório de carbono orgânico (CO) em ecossistemas terrestres. Cerca de dois terços do C global no solo são mantidos como carbono orgânico do solo (COS) (SCHARLEMANN et al., 2014). Uma rápida mudança no reservatório de C do solo terá um grande impacto na concentração de dióxido de C atmosférico (CO<sub>2</sub>) e afetará as mudanças climáticas globais. O estoque COS e suas diferentes distribuições horizontais e verticais desempenham um papel importante na abundância de gases de efeito estufa baseados em C (HOBLEY et al., 2015; LI et al., 2019).

De acordo com o (WIESMEIER et al., 2012), estudos anteriores relataram que a COS depende do clima, profundidade do solo, uso da terra e propriedades relevantes do solo. No entanto, os fatores que influenciam o estoque de COS são únicos em diferentes regiões, portanto, não está claro quais fatores desempenham o papel dominante em uma zona climática específica. A compreensão dos fatores pode ser útil para o desenvolvimento de estratégias para acessar o sequestro de C e melhorar a qualidade do solo em uma região específica (LI et al., 2019).

Os estudos de TPA vêm ganhando importância, no entanto, há necessidade de estabelecer metodologia padrão para a queima de matéria orgânica em solos com altos teores de MO, como por exemplo solos de terra preta por apresentar alto índice de carbono orgânico e estabilidade de agregado, conseqüentemente, buscar respostas através das análises das propriedades da física do solo.

A relação solo de TPA e textura do solo é uma questão a discutir, pois qual o papel da analogia do alto teor de matéria orgânica com as partículas menores da textura (argila e silte). A queima da MO, pode ocorrer variação na classe textura e, com isso, objetivo geral desta pesquisa foi avaliar as propriedades física do solo e os minerais ligado a argila em terra preta arqueológica e suas adjacências em busca de respostas para entender a formação das TPA. Os objetivos específicos foram verificar a classificação textural através do pré-tratamento com

queima da matéria orgânica em solo de terra preta; avaliar a inter-relação da estabilidade agregado e o estoque de carbono nos solos de terra preta em comparação como solos adjacentes.

## REFERÊNCIAS

ABIVEN, S.; MENASSERI, S.; CHENU, C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 1, p. 1–12, 2009.

ABRAR, M. M. et al. Variations in the profile distribution and protection mechanisms of organic carbon under long-term fertilization in a Chinese Mollisol. **Science of the Total Environment**, v. 723, p. 138181, 2020.

ALLEGRETTA, I. et al. The effect of temper on the thermal conductivity of traditional ceramics: Nature, percentage and granulometry. **Thermochimica Acta**, v. 581, p. 100–109, 2014.

AN, S. et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. **Catena**, v. 81, n. 3, p. 226–233, 2010.

ARROYO-KALIN, M. Las tierras antrópicas amazónicas: algo más que un puñado de tierra. **Las Siete Maravillas de la Amazonía precolombina**, n. October, p. 99–117, 2017a.

ARROYO-KALIN, M. Las Siete Maravillas de la Amazonía precolombina. In: BETANCOURT, S. R. AND C. J. (Ed.). **Las tierras antrópicas amazónicas: algo más que un puñado de tierra**. La Paz: [s.n.]. p. 99–117. 2017.

BARROS, T. R. M. et al. Distribution of textural and structural porosity in soils of Archaeological Dark Earth. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, p. 609–615, 2016.

BATISTÃO, A. C. et al. Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil. **Geoderma**, v. 363, n. July 2019, p. 114130, 2020.

BERNARDES, K. C. et al. Chemical attributes of archaeological black earth soils in Brazilian Amazon. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 10, p. 1334–1338, 2017.

BOIVIN, N. L. et al. Ecological consequences of human niche construction: Examining long-term anthropogenic shaping of global species distributions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 113, n. 23, p. 6388–6396, 2016.

BOKHORST, S. et al. Climate change effects on organic matter decomposition rates in ecosystems from the Maritime Antarctic and Falkland Islands. **Global Change Biology**, v. 13, n. 12, p. 2642–2653, 2007.

BROWNE RIBEIRO, A. T. et al. Results from Pilot Archaeological Fieldwork at the Carrazedo Site, Lower Xingu River, Amazonia. **Latin American Antiquity**, v. 27, n. 3, p. 318–339, 2016.

- CAMPOS, M. C. C. et al. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 598–609, 2011.
- CHAPLOT, V.; COOPER, M. Soil aggregate stability to predict organic carbon outputs from soils. **Geoderma**, v. 243–244, p. 205–213, 2015.
- CLEMENT, C. R. et al. The domestication of amazonia before european conquest. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 282, n. 1812, 2015.
- FERNANDES, C. G. et al. Koriabo. Baixo Amazonas. Xingu. 2018.
- DA COSTA, M. L. et al. Mineralogia e química de fragmentos cerâmicos arqueológicos em sítio com Terra Preta da Amazônia Colombiana. **Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 1, p. 17–23, 2011.
- DA SILVA, A. K. T. et al. Mineralogia e geoquímica de perfis de solo com terra preta arqueológica de Bom Jesus do Tocantins, sudeste da Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 4, p. 477–490, 2012.
- DA SILVA, D. M. P. et al. Spatial variability of soil properties in archeological Dark Earth sites under cacao cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1–12, 2016.
- DEVIREN SAYGIN, S. et al. Comparison of different aggregate stability approaches for loamy sand soils. **Applied Soil Ecology**, v. 54, p. 1–6, 2012.
- FERREIRA, B. A. et al. Óxidos de ferro das frações areia e silte de Um nitossolo desenvolvido de basalto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 405–413, 2003.
- GLASER, B. et al. The “Terra Preta” phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, n. 1, p. 37–41, 2001.
- GLASER, B. Prehistorically modified soils of central Amazonia: A model for sustainable agriculture in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 362, n. 1478, p. 187–196, 2007.
- 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**, v. 82, p. 39–51, 2012.
- HAGHVERDI, A.; ÖZTÜRK, H. S.; DURNER, W. Measurement and estimation of the soil water retention curve using the evaporation method and the pseudo continuous pedotransfer function. **Journal of Hydrology**, v. 563, n. June, p. 251–259, 2018.
- HOBLEY, E. et al. Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia. **Plant and Soil**, v. 390, n. 1–2, p. 111–127, 2015.
- HORNBORG, A. Ethnogenesis, regional integration, and ecology in prehistoric Amazonia: Toward a system perspective. **Current Anthropology**, v. 46, n. 4, p. 589–620, 2005.
- KÄMPF, N.; KERN, D. . O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. **Tópico em Ciência do Solo**, n. 2, p. 277–320, 2005.

- KAMPF, N.; MARQUES, J. J.; CURI, N. Mineralogia de solos Brasileiros. In: KER, J. C. et al. (Eds.). **Pedologia: fundamentos**. [s.l: s.n.]. p. 81–145. 2020.
- KERN, D. C.; DE LP RUIVO, M.; FRAZÃO, F. J. L. Terra preta nova: The dream of wim sombroek. **Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision**, p. 339–349, 2009.
- KOVEN, C. D. et al. The effect of vertically resolved soil biogeochemistry and alternate soil C and N models on C dynamics of CLM4. **Biogeosciences**, v. 10, n. 11, p. 7109–7131, 2013.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623–1627, 2004.
- LAL, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology**, v. 24, n. 8, p. 3285–3301, 2018.
- LEVIS, C. et al. How people domesticated Amazonian forests. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 5, n. JAN, 2018.
- LI, M. et al. Profile stock of soil organic carbon and distribution in croplands of Northeast China. **Catena**, v. 174, n. November 2018, p. 285–292, 2019.
- LIMA, H. N. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**. [s.l: s.n.]. 2017.
- LIMA, H. P. et al. Oca, origens, cultura e ambiente. **Revista Arqueologia Pública**, v. 14, n. 1, p. 96–128, 2020.
- LIMA, H. P.; MORAES, B. Arqueologia e comunidades tradicionais na Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 65, n. 2, p. 39–42, 2013.
- LOPES, P. R. D. C. et al. Análise geoambiental de sítios arqueológicos no estuário do rio Pará, Amazônia\*. **Habitus**, v. 17, p. 557–575, 2019.
- MACEDO, R. S. **Pedogênese e indicadores pedoarqueológicos em Terra Preta de Índio no município de Iranduba - AM**. Piracicaba: [s.n.].
- MACHADO, J. S. Dos artefatos às aldeias: Os vestígios arqueológicos no entendimento das formas de organização social da Amazônia. **Revista de Antropologia**, v. 49, n. 2, p. 755–786, 2006.
- MIKHA, M. M.; RICE, C. W. DIVISION S-3-SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY Tillage and Manure Effects on Soil and Aggregate-Associated Carbon and Nitrogen. n. 3, p. 809–816, 2004.
- NEVES, E. G. et al. Historical and socio-cultural origins of amazonian dark earths. In: **Amazonian Dark Earths : Origin, Properties e management**. [s.l: s.n.]. p. 29–51.
- NUNES, K. P. et al. Preliminary compositional evidence of provenance of ceramics from Hatahara archaeological site, central Amazonia. **Journal of Chemistry**, v. 201, p. 98\_112, 2013.
- RAHMATI, O. et al. Evaluation of different machine learning models for predicting and



mapping the susceptibility of gully erosion. **Geomorphology**, v. 298, p. 118–137, 2017.

RESENDE, M. et al. **Mineralogia de Solos Brasileiros: Interpretação e Aplicações**. Lavras-MG: [s.n.]. 2008

RIVERA, J. I.; BONILLA, C. A. Predicting soil aggregate stability using readily available soil properties and machine learning techniques. **Catena**, v. 187, n. April 2019, p. 104408, 2020.

SANTOS, L. A. C. DOS. Mineralogia e matéria orgânica de terra preta arqueológica e solos adjacentes não antrópicos na região do apuí Amazonas. Santa Maria – RS, 2018.

SCHELLEKENS, J. et al. Molecular composition of several soil organic matter fractions from anthropogenic black soils (Terra Preta de Índio) in Amazonia — A pyrolysis-GC/MS study. **Geoderma**, v. 288, p. 154–165, 2017.

SCHMIDT, M. J. et al. Dark earths and the human built landscape in Amazonia: A widespread pattern of anthrosol formation. **Journal of Archaeological Science**, v. 42, n. 1, p. 152–165, 2014.

SCHULTZ, M. K. et al. Optimizing the removal of carbon phases in soils and sediments for sequential chemical extractions by coulometry. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 1, n. 2, p. 183–190, 1999.

SHI, Z. et al. Model structures amplify uncertainty in predicted soil carbon responses to climate change. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1–11, 2018.

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, p. 7–31, 2004.

SOARES, M. D. R. et al. Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **GAIA SCIENTIA**, v. 12, p. 125–133, 2018.

SOMBROEK, W. G., RUIVO, M. L., FEARNSIDE, P. M., GLASER, B. & LEHMANN, J. Amazonian Dark Earth as carbon stores and sinks. In: J. LEHMANN, D. KERN, B. G. & W. W. (Ed.). **Amazonian Dark Earths: origin, properties, and management**. [s.l: s.n.]. p. 125–139. 2007.

SOUSA, M. A. et al. Atributos químicos e frações da matéria orgânica em solos antrópicos na Amazônia Oriental. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 29623–29643, 2020.

STAHL, P. W. The contributions of zooarchaeology to historical ecology in the neotropics. **Quaternary International**, v. 180, n. 1, p. 5–16, 2008.

STERGIADI, M. et al. Effects of climate change and land management on soil organic carbon dynamics and carbon leaching in Northwestern Europe. **Biogeosciences Discussions**, v. 12, n. 23, p. 19627–19671, 2015.

TAYLOR, U. S. R. M. Iron Oxides. In: WEED, J. B. D. S. B. (Ed.). **Minerals in Soil Environments**. [s.l: s.n.]. 2014.

TEIXEIRA, W. G. E; MARTINS, G. C. SOIL PHYSICAL CHARACTERIZATION. In:

- Amazonian Dark Earths : Origin, Properties e management.** [s.l: s.n.]. p. 271–285. 2007.
- WIESMEIER, M. et al. Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth. **Global Change Biology**, v. 18, n. 7, p. 2233–2245, 2012.
- XIAO, H. et al. Developing equations to explore relationships between aggregate stability and erodibility in Ultisols of subtropical China. **Catena**, v. 157, n. 26, p. 279–285, 2017.
- XU, X.; THORNTON, P. E.; POST, W. M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. **Global Ecology and Biogeography**, v. 22, n. 6, p. 737–749, 2013.

### 3. METODOLOGIA DE QUEIMA DA MATÉRIA ORGÂNICA PARA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA EM SOLOS DE TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA NA AMAZÔNIA

#### Resumo

Os solos amazônicos têm características peculiares relativas à matéria orgânica (MO), que é o índice mais utilizado para avaliar a qualidade do solo. A MO do solo pode ser quantificada pelo carbono orgânico total (COT) e tem papel importante na manutenção solo, porém o alto teor de matéria orgânica nos solos de terra preta dificulta a classificação da textura do solo. Desta forma, dois métodos foram testados para quantificar as frações granulométrica sem que ocorra a subestimação dos resultados. Objetivou-se com esse estudo verificar a proporção de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e tempo de queima pela gravimetria por incineração em mufla adequados para classificação textural de solo de Terra Preta Arqueológica. As amostras foram coletadas no horizonte antrópico de 4 solos de áreas de terra preta e dois solos de áreas adjacentes. No laboratório, as amostras foram submetidos ao teste de oxidação utilizando o peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) (OX1, OX2, OX3, OX4 e OX5), em triplicata equivalente em volume de 20, 40, 60, 80, 100 ml e na mufla utilizando tempo de queima 1, 2, 3, 4, 5 horas a 600 °C. Os resultados mostraram que o volume de 60 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> foi mais eficiente na classificação do triângulo textural. Os volumes de 20, 40, 80 e 100 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> obtiveram a mesma classificação franco argiloarenosa. Os resultados da queima utilizando mufla não apresentou variações nas frações texturais. A elevação de temperatura e altos volumes de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pode acarretar valores subestimados nos resultados.

**Palavras-chave:** Textura; Horizonte Antrópico; Frações

#### 3.1 Introdução

A Terra Preta arqueológica (TPA) são faixas de solos férteis e na região amazônica os solos, em sua maioria, são caracterizados por serem pobres em nutrientes e altamente intemperizados, ácidos e com altas taxas de renovação de matéria orgânica do solo (MOS).

As TPA são caracterizadas por elevados teores de nutrientes (especialmente de P, Ca e Mn) e MO, e são formadas pela entrada contínua de material inorgânico (cinzas, ossos, conchas) e orgânico (resíduos orgânicos, carvão, vegetação e sementes) e com presença de fragmentos de cerâmicas indígenas, artefatos líticos lascados e polidos, louças, vidros, metais e outros, espalhados na superfície do solo e nas camadas mais profundas (GLASER; BIRK, 2012; LOPES et al., 2019; SCHELLEKENS et al., 2017).

Como a região amazônica se localiza em um ambiente tropical úmido, o mesmo oferece condições favoráveis para a decomposição da matéria orgânica (MO), aumentando o processo de estabilidade ou desestabilidade da MO em TPA, esse processo pode comprometer

a formação e a manutenção da fertilidade química e física de solos tropicais e, conseqüentemente, pode afetar o conteúdo recalcitrante intrínseco de carbono escuro (MADARI et al., 2009).

A matéria orgânica do solo é uma complexa e variada mistura de substâncias orgânicas, as quais contêm, por definição, o elemento carbono. A distribuição da matéria orgânica no solo é variável, tanto em profundidade, ao longo do perfil do solo, quanto horizontal. Mas, a MO pode ter efeito de estimular ou interferir no crescimento das plantas, por isso a quantidade e qualidade da MO do solo torna-se fundamental para a qualidade do solo (BRADY; WEIL, 2013).

Logo, na determinação da distribuição do tamanho das partículas minerais do solo (textura) torna-se fundamental a remoção da MO em amostras de solo com alto conteúdo de MO e/ou com MO que apresenta alta recalcitrância, ou seja, com elevada capacidade de promover a agregação das partículas do solo.

Apesar da metodologia para análise granulométrica recomendar o pré-tratamento para a remoção da MO somente para solos que apresentam mais que 5% de MO, Donagemma et al., (2017), citam que em solos onde predomina o tipo de MO de alta estabilidade (húmus), como em solos de Terra Preta, a eliminação da MO também é fortemente recomendada, mesmo com o conteúdo abaixo do sugerido. Pois, a presença de MO nas amostras de solo pode causar uma super estimativa das frações areia (2-0,05 mm) e silte (0,05-0,002 mm), devido à formação de agregados estáveis e resistentes à dispersão mecânica e química (DONAGEMMA et al., 2017; MIKUTTA et al., 2005).

A oxidação úmida é o principal método de remoção da MO do solo e o reagente mais utilizado é o peróxido do hidrogênio ( $H_2O_2$ ) (KORCHAGIN et al., 2019; LAVKULICH; WIENS, 1970). O peróxido de hidrogênio foi introduzido por Robinson (1922) para análise da textura do solo e se tornou o reagente químico mais amplamente utilizado para a oxidação da MO (MIKUTTA et al., 2005).

Apesar de frequentemente utilizado, a oxidação da MO com peróxido é um método trabalhoso e que demanda muito tempo (SCHULTZ et al., 1999), e requer quantidades elevadas do reagente. Além disso, é necessário cuidado no tratamento das amostras no decorrer da análise devido à formação de efervescência, a qual pode resultar em perda da amostra.

Outro método utilizado para a “queima” da matéria orgânica é o da mufla há 600 °C (FONTANA, 2017). A quantificação pela via seca da gravimetria por incineração em mufla, representa uma opção de determinação total da MO que se baseia na perda de massa do solo pela incineração e aquecimento programado. Contudo, pode haver alteração em diversos

compartimentos componentes do solo, como minerais e orgânicos. Logo, o valor de MO obtido é satisfatório e o método é preferencialmente indicado para os solos com altos teores de MO, como aqueles de composição orgânica (FONTANA, 2017; PEREIRA et al., 2012).

Solos com grande quantidade de MO pode ajudar a formação e a estabilização dos agregados do solo, e segundo Edwards e Bremner (1967), criou-se uma teoria da formação de microagregados a partir da interação de partículas de argila e de matéria orgânica, chamados de complexos organominerais; Lespsch (1981) também observou uma interação da matéria orgânica com a textura do solo; de acordo com o Braida et al., (2011), percebeu particularidade dos complexos organominerais de solos com elevados teores de óxidos de ferro (Fe) e de alumínio (Al), a qual é determinante da estabilidade dos complexos formados. Em solos temperados, as ligações são predominantemente físicas e químicas que envolvem troca de ligantes entre grupos hidroxila (OH), da superfície dos óxidos, e de, principalmente, grupamentos carboxílicos (R-COOH) da matéria orgânica.

Como os solos com alto teor de carbono orgânico (CO) e de composição orgânica podem ter influência na classificação textural do solo, o estabelecimento de métodos de queima de MOS que minimizem superestimação de resultados torna-se necessário para o estudo dos mesmos. E como altas concentrações de peróxidos e elevadas temperaturas influenciam a classificação textural em solos com altos teores de MO, objetivou-se com esse estudo verificar a proporção de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e os tempo de queima pela gravimetria por incineração em mufla adequado para classificação textural de solo de Terra Preta Arqueológica.

## **3.2 Material e Métodos**

### **3.2.1 Áreas de estudo**

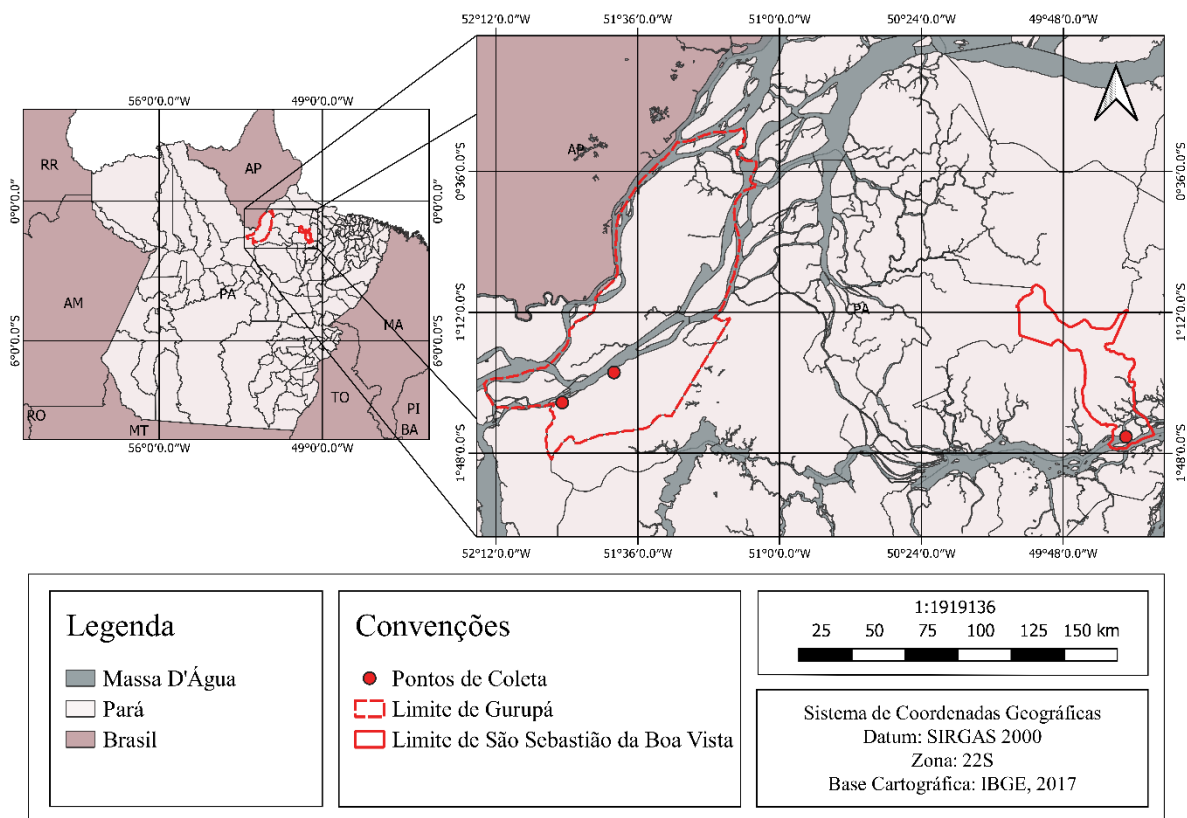
O estudo ocorreu no município de Gurupá-Pa, e também na Floresta Nacional de Caxiuanã, localizados nos municípios de Portel e Melgaço, Estado do Pará, região norte do Brasil. Foram avaliados seis pontos, sendo quatro pontos de terra preta (TPA1, TPA2, TPA3, TPA4) e dois pontos de solo adjacente (ADJ 1 e ADJ 2), como mostra a Figura 1.

O sítio Carrazedo (TPA1) foi eleito em função de suas características: é um sítio de enormes proporções a céu aberto implantado no topo de um elevado terraço na margem direita do rio Xingu, próximo a sua foz no rio Amazonas. Configura-se como pré-colonial e histórico, com ruínas de estruturas edificadas (fundações) visíveis no terreno (LIMA, 2017).

O sítio Gurupá-Miri (TPA2) é multicomponencial, altamente complexo e de grandes dimensões, atingindo um diâmetro de mais de um quilômetro quando considerados os seus vários componentes (Pré-colonial, de contato, quilombola). Toda a vila atual se encontra implantada sobre a mancha de terra preta resultante de uma ou mais ocupações indígenas.

Já em Caxiuanã, o sítio Mina I (TPA3) e sítio Manduquinha (TP4) são áreas localizadas nos municípios de Melgaço, dentro da Floresta Nacional de Caxiuanã. Essas áreas se caracterizam pela coloração escura e presença de artigos arqueológicos como artefatos de cerâmica, ossos, etc., floresta secundária, Latossolo Amarelo eutrófico antropogênico e Latossolo Amarelo distrófico antropogênico, respectivamente (KERN, 1996).

**Figura 1:** Localização dos pontos de coleta de amostras de solo na cidade de Gurupá, Estado do Pará.



. **Fonte:** MOURA, A. S (2020).

### 3.2.2 Amostragem do solo

A amostragem dos solos ocorreu no mês de março de 2019, e foram coletadas amostras na camada de 0-0.20 m com o auxílio do trado holandês, devido à espessura da faixa de terra preta. Em cada área foram coletadas amostras de solo com estrutura deformada para a determinação da granulometria.

### 3.2.3 Remoção da MO pelo método da oxidação

Cada amostra de Terra Preta Arqueológica (TPA) foi analisada separadamente com cinco níveis de oxidação do carbono orgânico do solo (COS) (OX1, OX2, OX3, OX4 e OX5), em triplicata. Para cada tratamento de oxidação, cerca de três vezes de 80 g de solo seco ao ar foram colocados em recipientes de vidro juntamente com 100 mL de água destilada. Em seguida, foram adicionados inicialmente 5 mL de peróxido de hidrogênio concentrado ( $H_2O_2$  35%) em cada recipiente de vidro, e a solução foi agitada com um bastão de vidro inserida em uma chapa aquecedora à 50°C até alcançar a concentração de cada tratamento. Após esse processo, cada recipiente foi deixado em repouso em temperatura ambiente, até cessar a reação. E a cada 1h, foram adicionados mais 5 mL de  $H_2O_2$ , agitando a solução com uma vareta de vidro.

Como ainda são necessários estudos relacionados a queima de matéria orgânica em solos com alto teor de carbono orgânico, faz-se necessário o uso de uma metodologia que possa esclarecer o processo de queima. Logo, foi proposto realizar cinco processos de oxidações para ajustar a quantidade ideal de peróxido para condições de terra preta, pois conforme a literatura, a quantidade mínima é de 3 vezes (BATISTÃO et al., 2020) até quantidades máximas não definidas, porém, deve ser adicionado o peróxido de hidrogênio até cessar a reação de efervescência da amostra (DONAGEMMA et al., 2017), sendo que o excesso de peróxido pode flocular e interferir nos resultados.

Desta forma, o processo de oxidação ficou definido em volumes de 20 mL em OX1, 40 mL em OX2, 60 mL em OX3, 80 mL em OX4 e 100 mL em OX5 de  $H_2O_2$  adicionados, que correspondem a 0,25; 0,5; 0,75; 1; e 1,25 mL de  $H_2O_2$  por g de solo, respectivamente.

O solo foi então lavado com água destilada para retirar o excesso de peróxido. E, para o tratamento mais concentrado, o solo foi lavado com água destilada por sete vezes. Após lavagem, as amostras foram secas em estufa com circulação de ar à 40°C, e então foram submetidas à análise granulométrica, através do método da pipeta, onde acrescentou-se 25 mL do dispersante hidróxido de sódio (NaOH) e 250 mL de água destilada, seguindo para a agitação horizontal por 16 horas. A fração areia foi determinada pelo método do peneiramento, a argila por sedimentação (pipeta) e o silte por diferença (GEE, G.W.; BAUDER, 1986).

### 3.2.4 Remoção da MO pelo gravimetria por incineração em mufla

O método gravimetria é baseado na medição de perda de peso resultante da oxidação da matéria orgânica em solo seco sob altas temperaturas (350 a 800 °C). A perda do peso é proporcional ao conteúdo de (MOS) (HOWARD; HOWARD, 1990; SCHULTE; HOPKINS, 2015; WRIGHT; WANG; REDDY, 2008). Na metodologia proposta Donagemma et al. (2017), a queima da matéria orgânica deve ser realizada a 600° C por 6 horas. Essa metodologia é muito eficaz em quantificar a matéria orgânica do solo, mas não cita nada a respeito se após a queima da MO, pode-se realizar o teste de granulometria.

Sabe-se que um solo em altas temperaturas, além de incinerar a matéria orgânica, alguns minerais também podem ser alterados e, conseqüentemente, afetar as cargas no solo, fazendo com que no final do processo de quantificar a argila, ocorra a floculação e alteração nos dados. Com isso propõe-se um ajuste na queima MO após a combustão estabelecida de 600° C, por um período de 1 h, 2h, 3h, 4h e 5h, com intuito de realizar posteriormente o fracionamento granulométrico em areia, argila e silte.

### 3.2.5 Estatística

Realizou-se as análises de variância dos dados pelo teste F ( $p < 0.05$ ), sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey 5%. As análises foram realizadas utilizando o programa R 3.5.1 (R Development Core Team, 2017), enquanto as figuras foram feitas no Origin 8.0.

## 3.3 Resultado

### 3.3.1 Distribuição do tamanho das partículas após remoção da MO pelo método por oxidação

Os solos de TPAs 1 e 2 apresentaram variação textural no volume de 60 mL de peróxido (Figura 2A e 2B). Foi observado que quando se aumentou o volume de 20 em 20ml, até o volume de 60 ml, houve um decréscimo na porcentagem da fração areia e um aumento na fração argila, apresentando classificação textural argiloso arenoso.

Com o aumento da concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para 80 ml, observou-se o inverso, ou seja, houve um aumento da fração areia e redução da fração argila, sendo a textura classificada como franco arenoso. Já a fração silte não apresentou variação expressiva com o aumento do volume de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

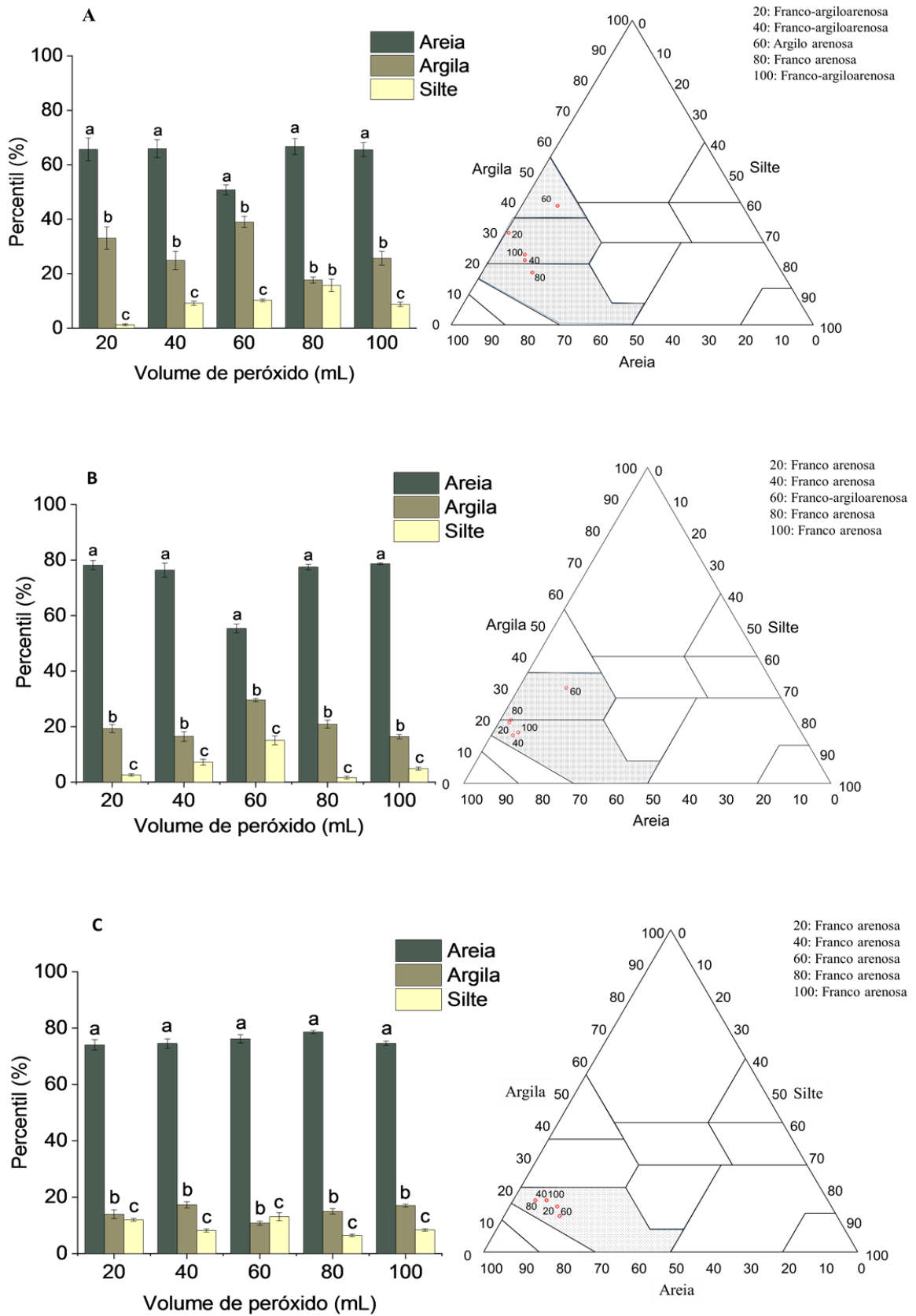
Nos solos de TPA 3 e 4, a variação das frações granulométricas ocorreram nas concentrações de 40, 60 e 80 ml (Figura 3D e 3E). Na TPA 3 a fração areia não apresentou uma variação expressiva quando comparado com as frações de partículas menores argila e silte. A



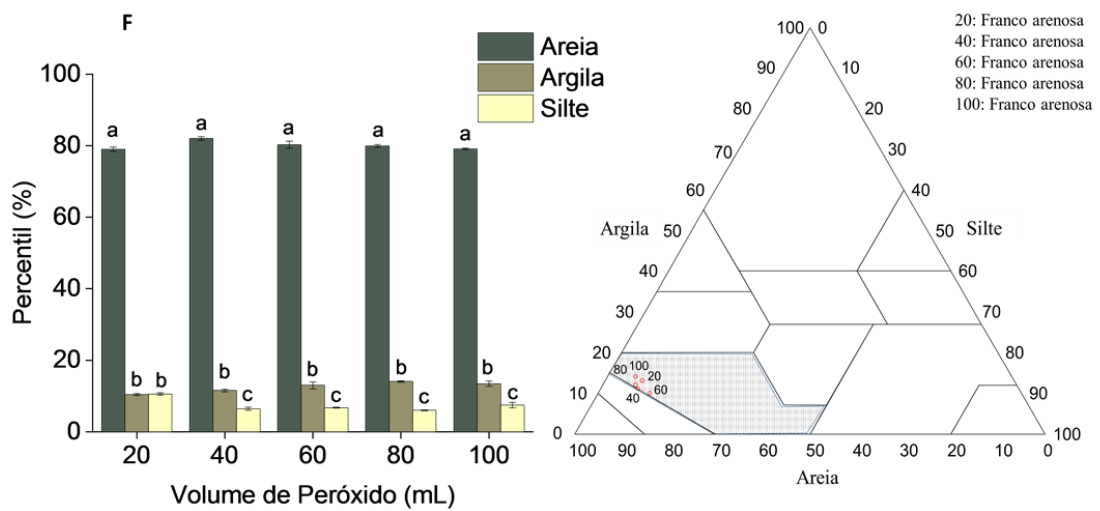
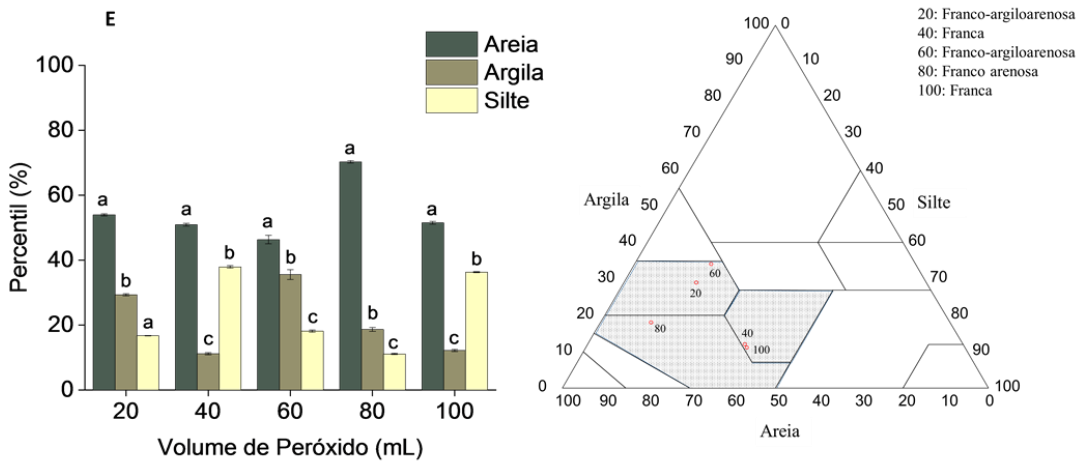
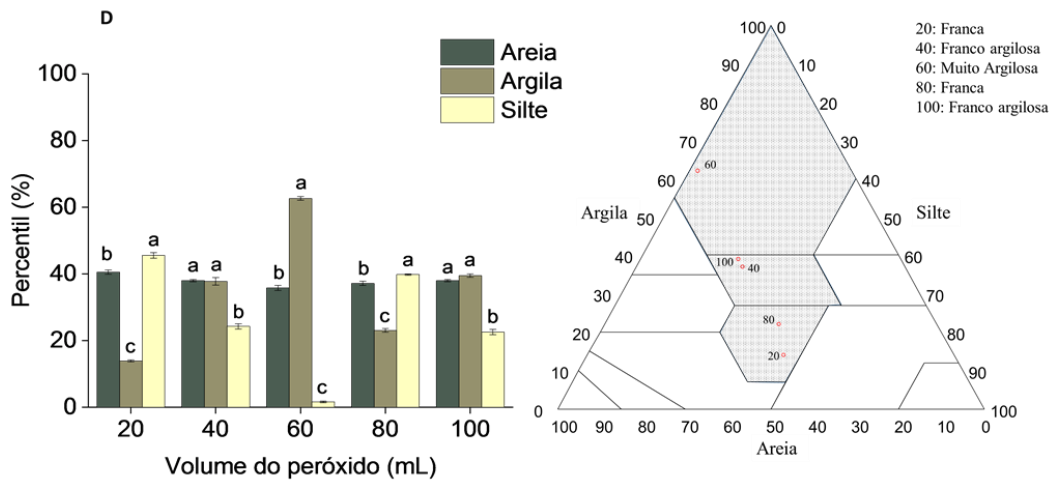
fração argila aumentou com aumento da concentração de 40 para 60 ml de  $H_2O_2$ , equivalente a 60% e, conseqüentemente, a fração silte diminuiu. O inverso também foi observado quando a concentração de peróxido foi elevada para 80 ml, pois houve um aumento na porcentagem de silte e redução no de argila (Figura 3D).

Na TPA 4 foi observado variações nas três frações granulométrica nas concentrações de 40, 60 e 80 ml, sendo mais expressivo em 60 ml (Figura 3E). E nos solos adjacentes não foram observados grandes variações com o aumento da concentração de peróxido, sendo os mesmos classificados como franco arenoso (Figura 2C e 3F).

**Figura 2:** Análise realizada com amostras de solo de terra preta arqueológico e solo adjacente com diferentes volumes de peróxidos no município de Gurupá, PA. (A) terra preta arqueológica 1; (B) terra preta arqueológica 2; (C) solo adjacente 1.



**Figura 3:** Análise realizada com amostras de solo de terra preta arqueológica e solo adjacente com diferentes volumes de peróxidos na Flona de Caxiuanã. (D) terra preta arqueológica 3; (E) terra preta arqueológica 4; (F) solo adjacente 2.



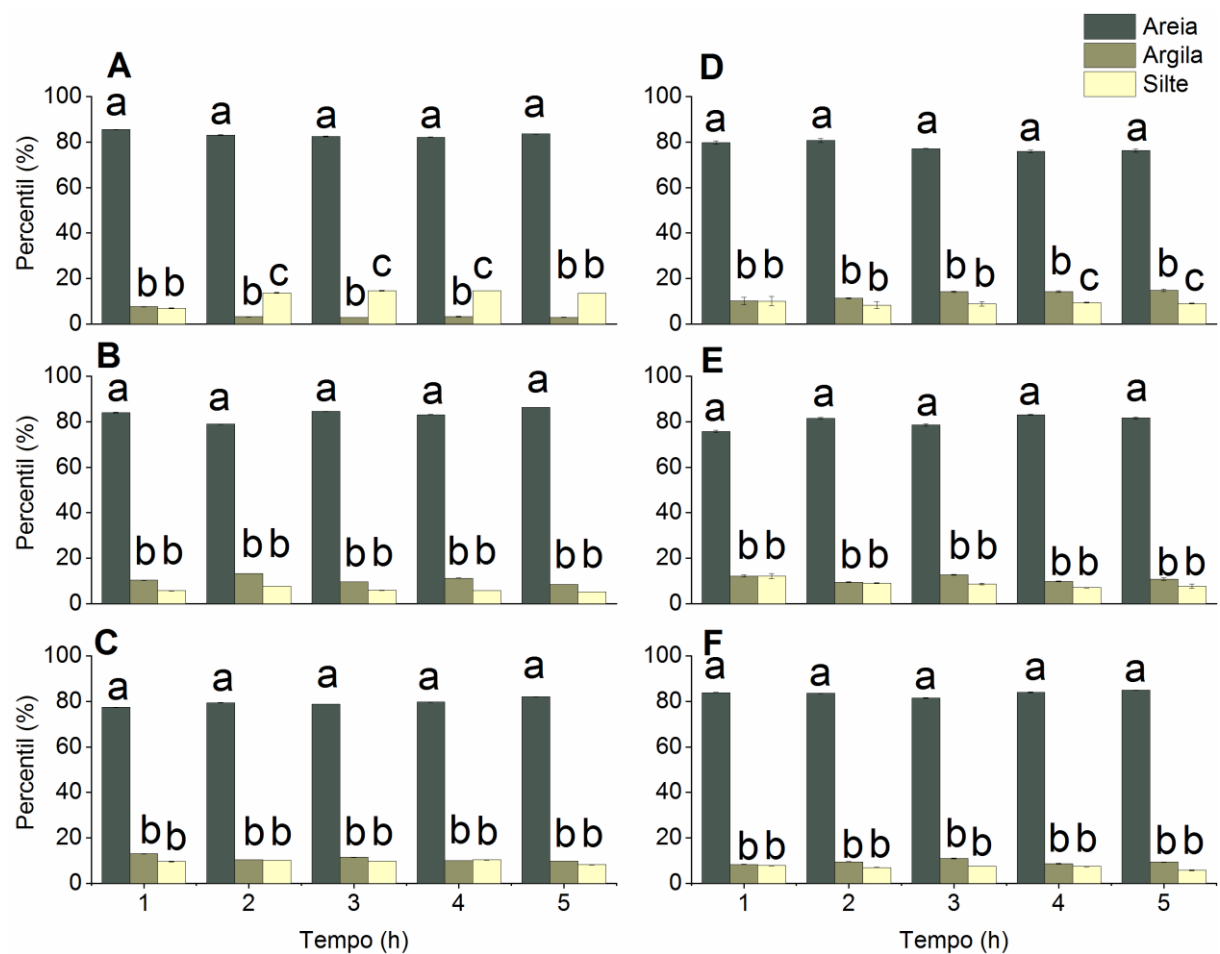
Fonte: MOURA, A. S. (2020).

### 3.3.2 Teste termogravimétrico

Todas as amostras de TPA (Figura 4A, 4B, 4D e 4E) não tiveram uma variação nas frações granulométrica com tempo de queima, apresentando classe textural areia franca (Figura 5). Foi observado no momento da análise que a fração argila nas amostras de solo com o tempo de 270 minutos, sedimentaram. A temperatura de 600°C, além de queimar a matéria orgânica, pode ter alterado os minerais, principalmente caulinita, que é um mineral abundante nos solos amazônicos.

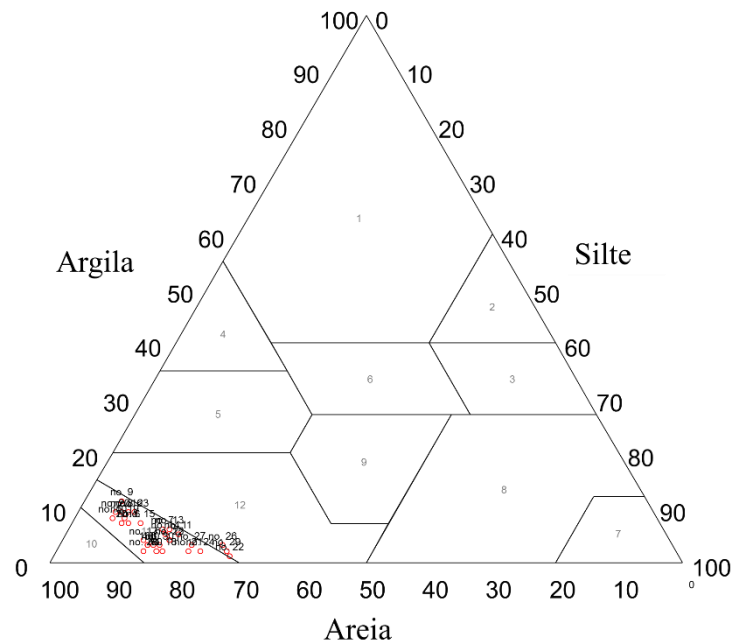
Quanto ao solo adjacente, não houve diferença na granulometria, logo, assim como o solo de terra preta, foi classificado como classe textural de areia franca (Figura 4C e 4F).

**Figura 4:** Análise realizada com amostras de solo arqueológico de terra preta e solos adjacentes com diferentes tempos (h) de queima pela Mufla a 600°C. (A) terra preta arqueológica 1; (B) terra preta arqueológica 2; (C) solo adjacente 1; (D) terra preta arqueológica 3; (E) terra preta arqueológica 4; (F) solo adjacente 2.



Fonte: MOURA, A. S (2020).

**Figura 5:** Classificação textural de todas as amostras que foram aplicados pelo pré tratamento (queima) da matéria orgânica, pela Mufla a 600° C.



### 3.4 Discussão

#### 3.4.1 Distribuição do tamanho das partículas após remoção da MO pelo método por oxidação

A análise realizada para classificação granulométrica em solos de terra preta a partir da queima da matéria orgânica, mostrou que a cada 20% de aumento da concentração de  $H_2O_2$ , ocorreu modificações na textura.

O protocolo para preparação de amostra antes da análise textural e mineralógica propõe o uso de 30% (peso / peso) de  $H_2O_2$ , mas 10 e 50% (peso / peso) de  $H_2O_2$  também foram sugeridos (MIKUTTA et al., 2005). Donagemma et al. (2017), propuseram adicionar porções sucessivas de água oxigenada a 30 volumes para solos com concentração  $> 5\%$  de MO, e repetir o processo até que a reação pare.

Como não se tem estudo científicos para solos de terra preta arqueológica, o presente estudo realizado mostra como solos com alto teor de matéria orgânica se comportam quando se aumenta o volume de peróxido. O uso do peróxido pode ser eficiente na queima da matéria orgânica e, conseqüentemente, na sua quantificação, contudo, o aumento dessa concentração pode alterar a análise textural, o que foi observado por Mclean (1931), que ao dobrar a concentração de  $H_2O_2$  de 6 para 12%, observou um pequeno aumento na remoção de carbono dos solos.

Segundo (BATISTÃO et al., 2020), ao trabalhar com a resistência microestrutural de Terras Escuras Arqueológicas com diferentes teores de carbono orgânico no solo, observaram que com aumento do volume de peróxido, a amostra com o valor inicial de  $81 \text{ g kg}^{-1}$  de CO

reduziu para  $50\text{g kg}^{-1}$ . Logo, a remoção da matéria orgânica por agente químico pode ser eficiente a um ponto que não atrapalhe a determinação das propriedades minerais e da textura do solo. Em se tratando de solo de terra preta arqueológica, são áreas com alto teor de matéria orgânica, devido restos de vegetais, cerâmicas e micro carvão.

De acordo com (KÖGEL-KNABNER; AMELUNG, 2021), o acúmulo de MO em solos pode ocorrer por associação de compostos orgânicos de origem vegetal ou microbiana com superfícies minerais e de óxido. As associações organominerais resultantes são aderidas em agregados do tamanho de silte, microagregados e unidades ainda maiores. Ainda segundo o autor, grande parte da MO é termodinamicamente lábil, mas persiste em solos devido a formação de microestrutura, com isso não é só as propriedades termodinâmicas da MO em si, mas sim a associação de MO com superfícies minerais e dentro de agregados que fornece acúmulo de CO a longo prazo.

#### 3.4.2 Teste termogravimétrico

A remoção da MO de amostras de solo por oxidação térmica é eficiente, mas quando o objetivo é determinar as frações granulométrica não se torna tão confiável, principalmente com altas temperaturas, pois pode ocorrer alterações nos grupos funcionais da matéria orgânica e minerais do solo (CALDERÓN et al., 2011); (PARIKH et al., 2014); (YEASMIN et al., 2017).

De acordo com (ULERY; GRAHAM, 1993), foi observado mudança na textura do solo quando a oxidação térmica foi realizada a  $400^{\circ}\text{C}$ , comportamento esse, onde a fração argila diminui e a fração areia e silte aumentam. Comportamento semelhante foi encontrado por (KETTERINGS; BIGHAM; LAPERCHE, 2000), que relatam a exposição do solo a temperaturas extremas ( $> 600^{\circ}\text{C}$ ), resultando em aumento acentuado na quantidade de areia e diminuição no silte, principalmente, na argila aplicada  $100^{\circ}\text{C}$  ( $11.2 \times 10^{-8} \text{ mg}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) e a  $600^{\circ}\text{C}$  ( $2583,9 \times 10^{-8} \text{ mg}^3 \text{ kg}^{-1}$ ).

Amostras de solo a  $350^{\circ}\text{C}$  pode sofrer modificações nas fases minerais dos óxidos (MIKUTTA et al., 2005). E a mufla a  $450^{\circ}\text{C}$  é muito eficiente para quantificar carbono orgânico e, conseqüentemente, altera as propriedades granulometria do solo (NÓBREGA et al., 2015).

A pesquisa realizada no presente estudo com a queima da matéria orgânica em solos de terra preta arqueológica utilizando a mufla, estatisticamente não foram satisfatórios para a classificação da textura do solo, pois todas as amostras ficaram classificadas como Areia franca.

### 3.5 Conclusão

Houve diferença entre os solos de TPA de Gurupá e de Caxiaunã nas frações de argila e silte com o tratamento de peróxido de hidrogênio.

Para o classificar a textura do solo de áreas de terra preta, o método da oxidação com peróxido de hidrogênio o (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) se tornou mais eficiente no volume de 60ml.

O volume mínimo (20 ml) e o máximo (100 ml) de (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) que podem subestimar os valores.

O método da mufla à 600° C não foi eficiente para pré-tratamento da matéria orgânica para a textura do solo.

### 3.6 Referências

BATISTÃO, A. C. et al. Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil. **Geoderma**, v. 363, n. July 2019, p. 114130, 2020.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Matéria Orgânica do Solo. In: **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. [s.l: s.n.]. p. 398, 2013.

BRAIDA, J. A. et al. Matéria Orgânica E Seu Efeito Na Física Do Solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 7, p. 221–278, 2011.

CALDERÓN, F. J. et al. Chemical Differences in Soil Organic Matter Fractions Determined by Diffuse-Reflectance Mid-Infrared Spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n. 2, p. 568–579, 2011.

DONAGEMMA, G. K. et al. Análise granulométrica. In: **Manual de métodos de análise de solo**. [s.l: s.n.]. p. 437, 2017.

EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. Dispersion of Soil Particles By Sonic Vibration. **Journal of Soil Science**, v. 18, n. 1, p. 47–63, 1967.

FONTANA, A. MATÉRIA ORGÂNICA. In: **Manual de métodos de análise de solo**. [s.l: s.n.]. p. 397, 2017

GEE, G.W.; BAUDER, J. . Particle-size analysis. In: **Methods of soil analysis**. [s.l: s.n.]. p. 383–411.

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**, v. 82, p. 39–51, 2012.

HOWARD, P. J. A.; HOWARD, D. M. Use of organic carbon and loss-on-ignition to estimate

soil organic matter in different soil types and horizons. **Biology and Fertility of Soils**, v. 9, n. 4, p. 306–310, 1990.

KETTERINGS, Q. M.; BIGHAM, J. M.; LAPERCHE, V. Changes in Soil Mineralogy and Texture Caused by Slash-and-Burn Fires in Sumatra, Indonesia. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 3, p. 1108–1117, 2000.

KÖGEL-KNABNER, I.; AMELUNG, W. Soil organic matter in major pedogenic soil groups. **Geoderma**, v. 384, n. March 2020, 2021.

KORCHAGIN, J. et al. Evidences of soil geochemistry and mineralogy changes caused by eucalyptus rhizosphere. **Catena**, v. 175, n. June 2018, p. 132–143, 2019.

LAVKULICH, L. M.; WIENS, J. H. Division s-3—soil microbiology and biochemistry. p. 3–6, 1970.

LOPES, P. R. D. C. et al. Análise geoambiental de sítios arqueológicos no estuário do rio Pará, Amazônia\*. **Habitus**, v. 17, p. 557–575, 2019.

MADARI, B. E. et al. As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. In: **Matéria orgânica dos solos Antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo**. [s.l: s.n.]. 2017.

MCLEAN, W. The Nature of Soil Organic Matter as Shown by the attack of Hydrogen Peroxide. **The Journal of Agricultural Science**, v. 21, n. 4, p. 595–611, 1931.

MIKUTTA, R. et al. Review: Organic matter removal from soils using hydrogen peroxide, sodium hypochlorite, and disodium peroxodisulfate. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 1, p. 120–135, 2005.

NÓBREGA, G. N. et al. Evaluation of methods for quantifying organic carbon in mangrove soils from semi-arid region. **Journal of Soils and Sediments**, v. 15, n. 2, p. 282–291, 2015.

PARIKH, S. J. et al. **Soil chemical insights provided through vibrational spectroscopy**. [s.l.] Elsevier, v. 126, 2014

PEREIRA, M. G. et al. Granulometric and humic fractions carbon stocks of soil organic matter under no-tillage system in Uberaba, Brazil. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 15, n. 1, p. 1–13, 2012.

ROBINSON, G. W. Note on the mechanical analysis of humus soils. **The Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 3, p. 287–291, 1922.

SHELLEKENS, J. et al. Molecular composition of several soil organic matter fractions from anthropogenic black soils (Terra Preta de Índio) in Amazonia — A pyrolysis-GC/MS study. **Geoderma**, v. 288, p. 154–165, 2017.

SCHULTE, E. E.; HOPKINS, B. G. Estimation of Soil Organic Matter by Weight Loss-On-Ignition. v. 049, n. 46, p. 21–31, 2015.

SCHULTZ, M. K. et al. Optimizing the removal of carbon phases in soils and sediments for



sequential chemical extractions by coulometry. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 1, n. 2, p. 183–190, 1999.

ULERY, A. L.; GRAHAM, R. C. Forest Fire Effects on Soil Color and Texture. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, n. 1, p. 135–140, 1993.

WRIGHT, A. L.; WANG, Y.; REDDY, K. R. Loss-on-ignition method to assess soil organic carbon in calcareous Everglades wetlands. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 39, n. 19–20, p. 3074–3083, 2008.

YEASMIN, S. et al. Evaluation of pre-treatment procedures for improved interpretation of mid infrared spectra of soil organic matter. **Geoderma**, v. 304, n. 2015, p. 83–92, 2017.

## 4. CARACTERIZAÇÃO DAS TERRAS PRETAS ARQUEOLÓGICAS NO MUNICÍPIO DE GURUPÁ-PA

### Resumo

Por sua origem antrópica, os solos de terra preta arqueológica (TPA) fornecem informações a respeito das interações entre populações humanas e seus ambientes ao longo do tempo. Estudos voltados ao esclarecimento destes assentamentos antigos e as características específicas dos solos de terra preta a eles associados têm avançado nas últimas décadas e apontado para a variabilidade interna deste tipo de solo. Neste sentido, objetivou-se com esse estudo verificar os atributos do solo em áreas de terra preta em diferentes localidades do município de Gurupá-Pará, para contribuir com o entendimento da formação das TPA desta região. Para esta caracterização físico-química do solo, foram coletados 8 pontos em 8 localidades com 3 profundidades: 10 cm, 20 cm e 30 cm e coletados 10 pontos nas mesmas localidades. Para a estabilidade de agregado as amostras foram coletadas em três profundidades. Para análise química foram coletadas 10 amostras de solos por localidade. Para análise mineralógica foram coletados 3 perfis de TPA, nos sítios Gurupá-miri; Carrazedo e Gurupá. O resultado de DMP mostra que a porcentagem da distribuição dos agregados (PDA) na profundidade de 10 cm foi maior na classe 4,76 mm permanecendo nas duas outras profundidades, exceto na localidade 4. A saturação por base acima de 50 % em todos os locais (L) atribui o caráter Eutrófico. O alumínio trocável mostrou-se com valor bem elevado, apresentando o mesmo comportamento os nutrientes Cálcio (Ca) e Fósforo (P) e Magnésio (Mg). A predominância caulínica (Kt) nos três perfis analisados era esperada, também foram observados em solos de terra preta goethita (gth), gibbsita (gb), strangite (str), albita (Ab), anatase (An), tridymite (Tr), minerais esses que foram desaparecendo com aumento da profundidade.

**Palavras-chave:** Formação; estabilidade de agregado; mineralogia

### 4.1 Introdução

Os solos de sítios arqueológicos na Amazônia denominados como terra preta arqueológica (TPA), em particular, fornecem informações importantes, para as relações passadas entre as populações humanas e seus ambientes. Atualmente as pesquisas estão voltadas e se concentrando na interpretação dos artefatos humanos, materiais orgânicos enterrados sob os solos e sedimentos, os mesmos podem ajudar a compreender as alterações que ocorrem nos solos, como o aumento da fertilidade e da matéria orgânica (GHILARDI, 2021).

Algumas análises se tornaram eficientes para busca de respostas quanto as interpretações do uso do solo em assentamentos e vilarejos e quanto as características específicas dos solos com TPA, dentre elas estão a análise de fosfato, fluorescência de raios-x, espectroscopia) e recentemente incluindo também as análises de pH do solo, suscetibilidade magnética, carbono orgânico e nitrogênio do solo (NEJMAN et al., 2018, 2020; SALISBURY, 2020)

Ainda há muito que estudar quando se fala em formação dos solos de TPA. Macedo (et al., 2017), relatam o comportamento relacionado a textura do solo e a matéria orgânica do solo, que altera a classificação dos perfis, possivelmente pela inter-relação/fusão matéria orgânica com partículas do tamanho de areia. (SILVA et al., 2021), mostra que a caracterização da mineralogia da argila usando difração de raios-X não mostrou diferenças no tipo de argilas dominantes encontradas nos perfis de TPA e áreas adjacentes.

Silva et al. (2021), destacaram que há necessidade de uma visão mais ampla da evolução da paisagem como um caminho para a compreensão da formação de TPA, e redirecionamento de aplicações para uso sustentável e conservação do solo, como as pesquisas relacionadas ao biochar (condicionantes do solo). Ainda de acordo como os autores, TPA devem ser investigados para um potencial de origem aluvial, com base em propriedades físicas e fontes elementares, para melhorar o conhecimento básico da transição de populações nômades para sedentárias na Amazônia e sua influência nas trajetórias socioecológicas.

Em contrapartida, Lombardo et al. (2020), reforçaram que a formação de áreas antrópicas não é apenas um efeito incidental do descarte de resíduos de alimentos, mas também pode ser vista como um processo ativo de construção de nicho. A região amazônica tem uma grande configuração geomórfologica, atividade humana, mudanças na cobertura vegetal e inundações, e todos esses fatores podem indicar uma contribuição aluvial de nutrientes para o local no passado e contribuir para os estudos de TPA.

Kern et al. (2017) apontaram para enorme variabilidade de solos de TPA entre os sítios de distintas regiões, e também intra-sítio. Logo, mesmo com avanços de dados (químicos, físicos e biológicos) em estudos para explicar a formação e comportamentos dos solos de sítios arqueológicos, há a necessidade de mais análises das propriedades do solo, em diferentes regiões da Amazônia, que venha a contribuir com as pesquisas, devido aos diferentes ambientes que os sítios arqueológicos se encontram, além do clima e atividades. Com isso, objetivo do estudo foi verificar os atributos do solo em áreas de terra preta em diferentes localidades, para o entendimento da formação dos solos de TPA.

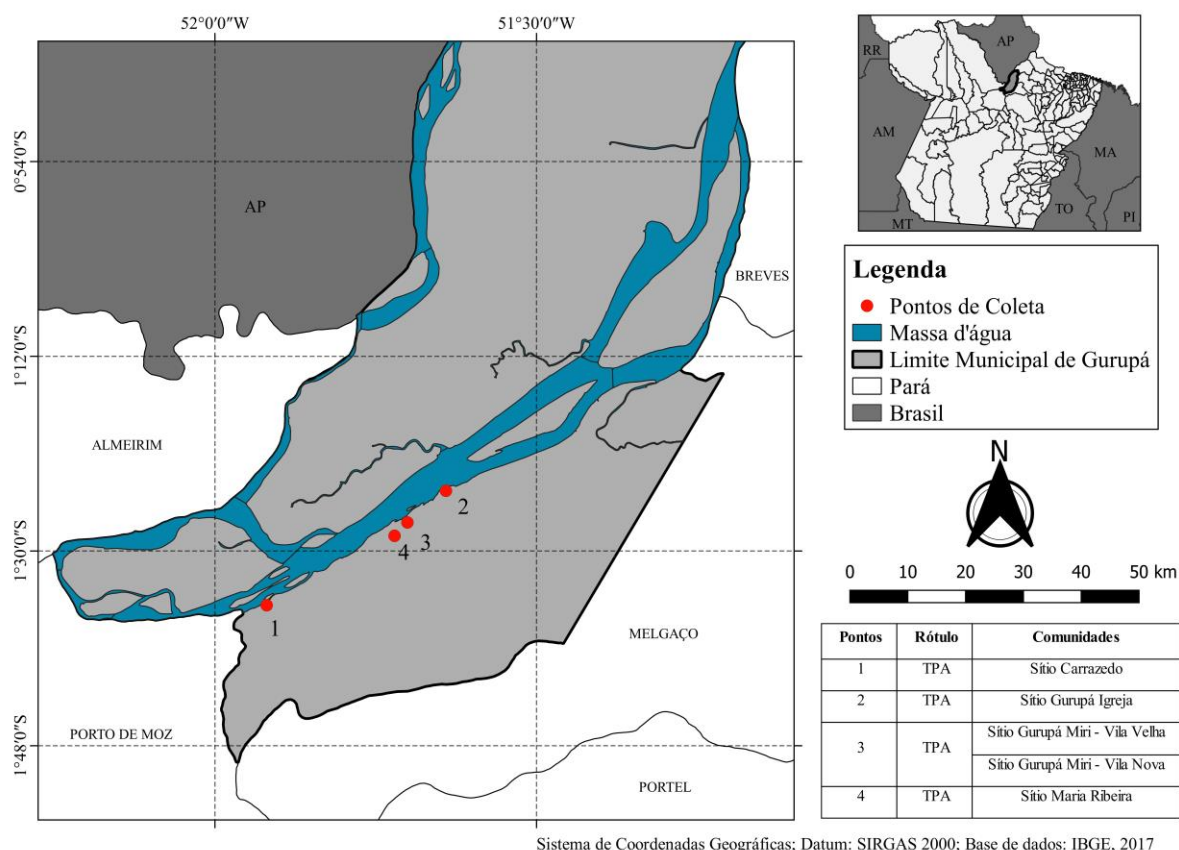
## 4.2 Material e métodos

### 4.2.1 Localização

A área de amostragem encontra-se no município de Gurupá – Estado do Pará, pertence à mesorregião do Marajó e à microrregião de Portel, na margem do rio Amazonas, na ilha do Marajó. A mesma possui elevado potencial arqueológico, com a presença de sítios pré-coloniais e coloniais com TPA (LIMA et al., 2020).

Gurupá foi um antigo núcleo colonial de povoados que se estabeleceram e se desenvolveram a partir da navegação fluvial, da agricultura de várzea nas planícies fluviais e da ocupação de barrancas mais elevadas em terraços e tabuleiros, por onde foram implantados os sítios urbanos. Geograficamente encontra-se entre 03°14'22" e 03°15'47" de latitude Sul e a 60° 13'02" e 60° 13'50" de longitude Oeste (Figura 1).

Figura 1: Mapa de localização das coletas.



As amostragens foram feitas em sítios de TPA dentro da cidade de Gurupá (pontos denominados Gurupá-Aeroporto e Gurupá-Igreja) e também em sítios localizados em comunidades quilombolas do município, na confluência dos rios Xingu e Amazonas. São estas:

Carrazedo, Gurupá-miri e Maria Ribeira. Dentro de cada área ou sítio, foram selecionados locais com uso de solo e vegetação diferenciados, conforme mostra a tabela 1:

**Tabela 1:** Pontos de coletas no município de Gurupá, Estado do Pará.

Legendas	Local	Sítio Arqueológico	Tipo	Vegetação
L1	Gurupá	Carrazedo	TPA	Floresta secundaria
L2	Gurupá	Carrazedo	ADJ	Floresta secundaria
L3	Gurupá	Gurupá - Aeroporto	ADJ	Plantas rasteiras
L4	Gurupá	Gurupá - Igreja	TPA	Frutíferas
L5	Gurupá	Gurupá miri - vila Velha	TPA	Solo descoberto
L6	Gurupá	Gurupá miri - vila Nova	TPA	Cultivo de pupunha
L7	Gurupá	Maria Ribeira	TPA	Plantas rasteiras
L8	Gurupá	Maria Ribeira	ADJ	Floresta secundaria

Adj: Adjacente; TPA: Terra Preta Arqueológica

#### 4.2.2 Amostragem

Antes de selecionar as áreas de coleta, foram feitas sondagem para verifica os pontos de terra preta TP. Em seguida foram coletadas amostras de solo em 8 pontos em 8 localidades do município de Gurupá, em cada ponto foram coletadas amostras deformada de solos em três profundidades 10, 20 e 30 cm para a análise de estabilidade, para a química foram coletadas 10 amostras deformadas em cada localidade em 20 cm de profundidade, na mineralogia foram coletadas amostras deformadas de três perfis a cada 10 cm de profundidade.

#### 4.3.1 Estabilidade de agregado do solo

Foram coletadas amostras de solo indeformada em blocos, retiradas 50g de solo e passadas de 4,76 mm de diâmetro de malha. A distribuição dos agregados, por classes de diâmetro médio ( $2,0 \geq X > 1,0$  cm, de  $1,0 \geq X > 0,5$  cm, de  $0,5 \geq X > 0,25$  cm e de  $0,25 \geq X > 0,105$  cm), foi obtida submetendo-se as amostras de solo ao peneiramento via úmida (Embrapa, 2017). Para isso, foram pesadas amostras de 50 g, que ficaram retidas na peneira de 4 mm, umedecidas com pulverizador, colocadas em um jogo de peneiras com malhas de 2,00; 1,00; 0,500; 0,250, 0,105 e 0,053 mm, e submetidas à agitação vertical no aparelho de Yooder, durante 15 minutos.

Após o tempo determinado, o material retido em cada peneira foi retirado, separadamente, com o auxílio de jato d'água, colocado em placas previamente pesadas e identificadas, e levado à estufa (65 °C) até peso constante. Após a secagem, obteve-se a massa dos agregados retida em cada peneira. Com os dados de massa de agregados foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP).

O DMP foi calculado de acordo com a seguinte expressão:  $DMP = \sum x_i y_i$ ; em que:  $X=1$  i = intervalo de classe:  $8,0\text{mm} \geq X > 2,0$  mm, de  $2,0 \geq X > 1,0$  mm, de  $1,0 \geq X > 0,5$  mm, de  $0,5 \geq X > 0,25$  mm e de  $0,25 \geq X > 0,105$  mm;  $x_i$  = é o diâmetro do centro de classe (mm);  $y_i$  = é a razão entre a massa de agregados dentro da classe ( $x_i$ ) e a massa total de agregados (SALTON et al., 2017).

#### 4.3.2 Densidade do solo

A densidade do solo ( $D_s$ ) foi obtida pelo método do anel volumétrico seguindo metodologia proposta por (ALMEIDA, BRIVALDO GOMES DE et al., 2017).

#### 4.3.3 Análise química

Em relação às análises químicas: o pH do solo foi determinado potenciométricamente utilizando-se uma relação solo: água de 1:2,5, em água e KCl; cálcio, magnésio e alumínio trocáveis foram extraídos com a solução extratora de KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; potássio, sódio e fósforo disponível, foram extraídos pelo extrator Mehlich<sup>-1</sup>, sendo que o K<sup>+</sup> e o Na<sup>+</sup> foram determinados por espectrofotometria de chama, e o P foi determinado por colorimetria.

A acidez potencial (H+Al) foi extraída com solução tamponada a pH 7,0, de acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> e determinado volumetricamente com solução de NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup> (DONAGEMMA et al., 2017). Com base nos resultados das análises químicas, foram calculados os valores de somas de bases (S), capacidade de troca catiônica (T), saturação por bases (V%) e percentagem de saturação por alumínio (m%).

#### 4.3.4 Carbono orgânico total e estoque de carbono

O Carbono orgânico total foi estimado pela perda de ignição a 450 ° C, enquanto para o Carbono inorgânico a perda de temperatura de ignição foi de 950 ° C (HOUBA et al., 1995). As amostras foram levadas para a condição de secagem em estufa por pré-tratamento a 105 °

C. A diferença entre os pesos a 450 ° C e 105 ° C ocorreu a perda de conteúdo de matéria orgânica. O carbono inorgânico do solo foi obtido observando a perda de massa entre 450 ° C e 950 ° C e multiplicando-a por uma constante de conversão de 0,273 para converter a massa de CO<sub>2</sub> em massa de carbono. Os estoques de carbono do solo foram calculados de acordo com a Equação 1:

$$C \text{ stoks (Mg ha}^{-1}\text{)} = \sum_{i=1}^j C_i \times P_i \times d_i \times 10000 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde;  $C_i$  é o carbono do solo ( $\text{g g}^{-1}$ );  $\rho_i$  é a densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ),  $d_i$  é a profundidade da camada do solo (m) para a camada  $i$  enquanto  $j$  é o número de camadas. O valor de 10.000 indica o estoque para 1 ha de terra.

#### 4.3.5 Análises mineralógicas

A determinação da análise mineralogia foram realizadas na fração argila por difração de raios-X (DRX). Nesta análise foram utilizados três perfis, Perfil 1: (0-100cm); perfil 2: (0-240 cm) e perfil 3: (0-100 cm), para obtenção da fração argila e posteriormente realização da análise mineralógica.

Para se obter a fração argila, as amostras de cada horizonte foram dispersas com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (dispersante químico), e submetidas a agitação lenta em equipamento tipo Wagner por 16 horas (dispersão física) conforme preconizados por Gee e Or (2002).

A fração argila foi separada da fração silte por sifonação para baldes plásticos de 10 litros em intervalos de tempo variados, obedecendo sempre à lei de Stockes para estabelecer a altura de coleta. Após a separação as amostras foram secas em estufa à 60°C e, posteriormente, maceradas em almofariz de ágata e passadas em peneira de 48 mesh para homogeneização das partículas.

As análises foram realizadas em difratômetro de Raios-X (DRX) modelo Shimadzu XRD 6000. As amostras foram inicialmente analisadas no DRX na forma de pó não orientado, para uma avaliação global da assembleia mineralógica (JACKSON, 1975). A varredura, nas amostras difratadas em pó não orientado, foi de 3 a 50 ° 2 $\theta$  com velocidade de 1° 2  $\theta$  min<sup>-1</sup>.

#### 4.3.6 Estatística

Realizou-se análises de variâncias dos dados pelo teste F ( $p < 0.05$ ), sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey 5%. As análises foram realizadas utilizando o programa R 3.5.1 (R Development Core Team, 2017)

## 4.4 Resultado

### 4.4.1 Distribuição de agregados

A porcentagem da distribuição dos agregados (PDA) na profundidade de 10 cm foi maior na classe 4.76 mm alcançando mais de 50% em todas as localidades, exceto o L4 que obteve os menores valores de PDA. Por outro lado, a maior proporção, para esta localidade, foi de 30,79% e ocorreu na classe de 0,250 mm (Tabela 2).

**Tabela 2:** Dados de estabilidade de agregados em 8 localidades de coleta no município de Gurupá-PA.

Tamanho mm	Localidade							
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
	-----%-----							
	<b>0-10 cm</b>							
4.760	93.66a	88.82a	79.92a	9.63d	88.67a	69.13a	86.30a	82.95a
2.000	2.41b	2.01b	3.27c	3.82e	1.98b	11.95b	2.34b	2.86bc
1.000	1.22b	1.95b	2.56c	7.55de	2.61b	6.97c	3.13b	4.34bc
0.500	0.89b	1.84b	11.70b	16.15c	2.98b	5.99cd	3.52b	4.46b
0.250	0.78b	1.81b	1.81c	30.79a	2.04b	3.97cd	3.26b	3.68bc
0.105	0.70b	1.32b	0.48c	22.30b	1.12b	1.76d	0.77b	1.11c
0.053	0.65b	2.26b	0.26c	10.76d	0.59b	1.22d	0.68b	0.59c
	<b>10-20cm</b>							
4.760	89.62a	87.50a	81.10a	32.27a	79.12a	88.24a	85.18a	93.35a
2.000	3.08b	4.00b	3.24b	1.95e	1.17b	1.95b	5.09b	0.62b
1.000	2.39bc	2.04bc	4.08b	4.82de	3.73b	2.67b	3.30b	1.23b
0.500	2.22bc	2.14bc	4.65b	8.89d	5.03b	2.13b	2.82b	1.83b
0.250	1.71bc	2.02bc	4.86b	20.78b	5.55b	1.15b	2.29b	2.19b
0.105	0.63c	0.50bc	1.04b	14.97c	2.07b	2.57b	0.50b	0.36b
0.053	0.46c	1.79c	1.03b	16.32c	3.33b	0.89b	0.81b	0.43b
	<b>20-30 cm</b>							
4.760	85.70a	5.83a	69.14a	9.90c	43.59a	31.10a	92.62a	79.21a
2.000	3.36b	0.42b	7.64b	2.30d	4.80d	3.26d	1.02b	2.39cd
1.000	2.72b	76.39bc	6.88b	5.66cd	10.09bc	11.77c	2.06b	3.92cd
0.500	2.64b	4.86bc	7.08bc	16.17b	13.58b	21.16b	1.59b	6.32b
0.250	2.42b	7.58cd	6.45bcd	24.97b	14.05b	20.91b	1.49b	4.40c
0.105	1.74b	2.01d	1.53cd	22.68a	5.25d	4.97cd	0.53b	1.35d
0.053	1.38b	2.90d	1.29d	18.32a	7.64cd	6.82cd	0.70b	2.40cd

Valores médios de três repetições. Letras iguais, na linha, indicam que as médias não diferem ao nível de 5 %. L1: Carrazedo TPA ; L2: Carrazedo solo Adjacente; L3: Aeroporto solo Adjacente; L4: Gurupá igreja TPA; L5: Gurupá vila velha TPA; L6: Gurupá vila nova TPA; L7: Maria Ribeira TPA; L8: Maria Ribeira solo Adjacente.

Na profundidade de 20 cm o L4 manteve o resultado, estando as demais localidades com mais de 50% dos agregados mantidos na classe de 4,76mm. Já a 30 cm de profundidade apenas



em L1, L3, L7 e L8 a PDA foi superior a 50%. A alta PDA na classe 4,76, possivelmente, devido ao alto teor de carbono orgânico e, conseqüentemente, do estoque de carbono.

Um caso a parte aconteceu com localidade 2 por se tratar de um solo adjacente ao solo de terra preta, na profundidade de 30 cm os agregados na maior malha diminuíram, conseqüentemente devido à ausência de fatores ligantes que faz suporte a agregação, diferente ocorreu na localidade 4, área de solos de terra preta, mas que os agregados se desfizeram nas maiores malhas, isso pode implicar na qualidade da matéria orgânica do local que conseqüentemente as forças ligantes se tornam fracas e os agregado se desfazem.

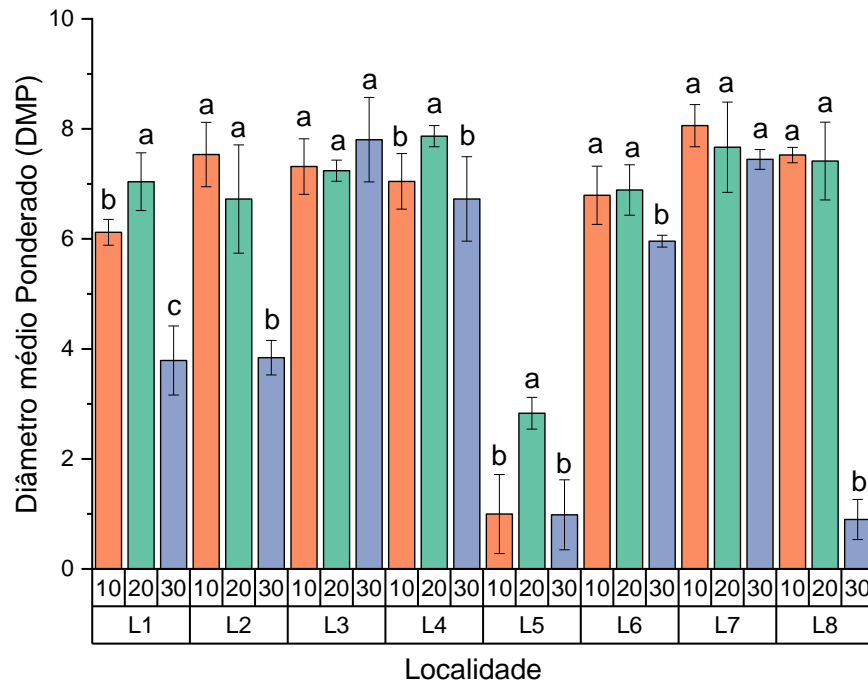
Outra questão é devida alguns fatores que interfere na agregação como por exemplo: tipo e teor de argila, carbonato de cálcio, óxidos de ferro, alumínio e manganês, exsudatos orgânicos de plantas, substâncias orgânicas provenientes da ação de microrganismos e outros compostos orgânicos. Podem-se incluir, também, os ciclos de umedecimento e secagem como importante fator ambiental que interfere na agregação do solo.

Corroborando com os resultados da distribuição relativa de agregados, as localidades relacionadas a suas profundidades, apresentaram maior diâmetro médio ponderado (DMP), que não diferiram entre si. Destacando a profundidade de 30 cm em L1, L2, L5 e L8.

O diâmetro médio ponderado (DMP) apresentou diferença significativa ( $p < 0,05$ ), em profundidade e localidades de solos de terra preta (Figura 2). Na comparação entre profundidade a localidade carrazedo não apresentou diferença significativa na profundidade de 10 e 20 cm, essa diferença foi observada na profundidade de 30cm alcançando 3.45 mm de DMP. O que não aconteceu nas outras localidades consideradas solos de terra preta, todas as profundidades não apresentaram diferença significativa.

Os dois solos adjacentes tiveram o mesmo comportamento, apresentando diferença profundidade 30 cm.

**Figura 2:** Valores médios de três repetições. Letras iguais, na linha, indicam que as médias não diferem ao nível de 5 %. L1: Carrazedo TPA; L2: Carrazedo solo Adjacente; L3: Aeroporto solo Adjacente; L4: Gurupá igreja TPA; L5: Gurupá vila velha TPA; L6: Gurupá vila nova TPA; L7: Maria Ribeira TPA; L8: Maria Ribeira solo Adjacente.



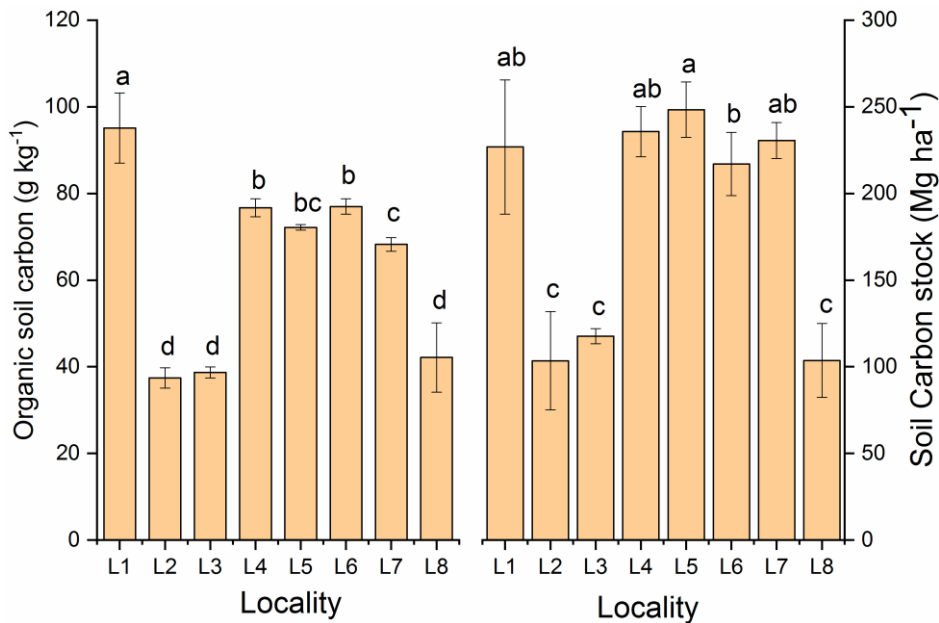
O maior valor de  $91,78 \text{ g kg}^{-1}$  carbono orgânico do solo (COS) foi encontrado no L1 área de TPA, que corresponde a comunidade Carrazedo que configuram-se como pré-colonial e histórico, a coloração escura do solo caracteriza uma área de presença de fragmentos de cerâmicas e resíduos orgânicos, isso mostra que no local de estudo a interação entre os Europeus, povos ameríndios e os brasileiros iniciou-se no século XVI.

As localidades L2, L3 e L8, são áreas de solos adjacentes e não foi observado diferença estatística entre si, contudo, foi observado diferença entre as localidades consideradas TPA. Com baixos teores de Carbono orgânico a mesma se encontra de acordo com o teor de CO em áreas de mata nativa.

As localidades L4, L5, L6 e L7 são áreas de TPA com altas teores de CO assim como também L1. São áreas pré-coloniais, com histórico de depósitos de fragmentos de cerâmicas, louças e ossos. Essas localidades configuram-se com altos teores de carbono orgânico, na figura (2), mostra essa concentração em estoque de carbono orgânico no solo nas L1, L4, L5, L6 e L7, o mesmo apresentam diferença estatisticamente com as localidades L2, L3 e L8, que são considerados solos adjacente.

**Figura 3:** Valores médios de três repetições. Letras iguais, na linha, indicam que as médias não diferem ao nível de 5 %. L1: Carrazedo TPA; L2: Carrazedo solo Adjacente; L3: Aeroporto solo

Adjacente; L4: Gurupá igreja TPA; L5: Gurupá vila velha TPA; L6: Gurupá vila nova TPA; L7: Maria Ribeira TPA; L8: Maria Ribeira solo Adjacente.



Altos valores de pH foi observado em L4 e L5 (6,31 e 6,83) respectivamente e valores baixos de 3,69 e 3,88 para L7 e L8. A capacidade de troca catiônica apresentou-se alta em L2, L5 e L6. A saturação por base acima de 50 % em todos os locais (L) atribui o caráter Eutrófico. Alumínio mostrou-se com valor bem elevado de 3,23 em L8. Por outro lado, os nutrientes Cálcio (Ca) e Fósforo (P) e Magnésio (Mg) apresentaram valores bem elevados 11,90 e 6,96 cmol.dm<sup>-3</sup> para L1 e L5 e 2796,44 e 3439,33 mg.kg<sup>-1</sup> para L1 e L4 e 2,13 e 3,20 cmol.dm<sup>-3</sup>. Contudo, as demais variáveis mostraram-se com um bom conteúdo nos solos de terra preta e adjacentes (Tabela 3).

**Tabela 3:** Dados de análise química de terra preta arqueológica no município de Gurupá-Pa.

Loc	pH	Ca	Mg	Al	Al+H	K	P	SB	CTC pH 7 (T)	V	m
L1	4.38d	11.90a	2.13b	0.30a	5.60e	5.22h	2796.44b	19.25f	24.85h	77.46d	1.53de
L2	4.43d	1.13e	1.80bc	2.20b	10.16b	73.58a	86.15e	76.51a	86.67a	88.28b	2.80d
L3	4.17e	0.76e	1.60bcd	2.20b	8.50c	21.21f	4.36e	23.57e	32.07f	73.50e	8.54a
L4	6.31b	5.10cd	1.23cd	1.16c	6.06d	16.21g	3439.33a	22.54e	28.60g	78.81d	4.89c
L5	6.83a	6.96b	1.23cd	0.76cd	4.10f	53.83b	2209.44c	62.02b	66.12b	93.80a	1.21e
L6	4.90c	3.83d	3.20a	0.46d	10.03b	46.27c	536.15d	53.30c	63.33c	84.16c	0.86e
L7	3.69g	5.16c	1.33bcd	0.53d	8.80c	36.26e	587.61d	42.75d	51.55e	82.93c	1.22e

L8 3.88f 0.93e 0.86d 3.23e 12.16a 41.38d 46.43e 43.17d 55.33d 78.02d 6.96b  
 Valores médios de três repetições. Letras iguais, na linha, indicam que as médias não diferem ao nível de 5 %. L1: Carrazedo TPA; L2: Carrazedo solo Adjacente; L3: Aeroporto solo Adjacente; L4: Gurupá igreja TPA; L5: Gurupá vila velha TPA; L6: Gurupá vila nova TPA; L7: Maria Ribeira TPA; L8: Maria Ribeira solo Adjacente.

#### 4.4.2 Atributo mineralógico da fração argila

As análises de difração de raios-X (DRX) foram realizadas na fração argila em três perfis de solos de terra preta e os resultados são apresentados nas (Figura 4): sítio Gurupá-miri; (Figura 5): sítio Carrazedo; (Figura 6): sítio Gurupá-igreja. Observa-se que a mineralogia dos solos de TPA foram bastante semelhantes nas maiores profundidades nos três perfis.

Figura 4: Dados de mineralogia do perfil no sítio arqueológico Gurupá miri - vila Velha.

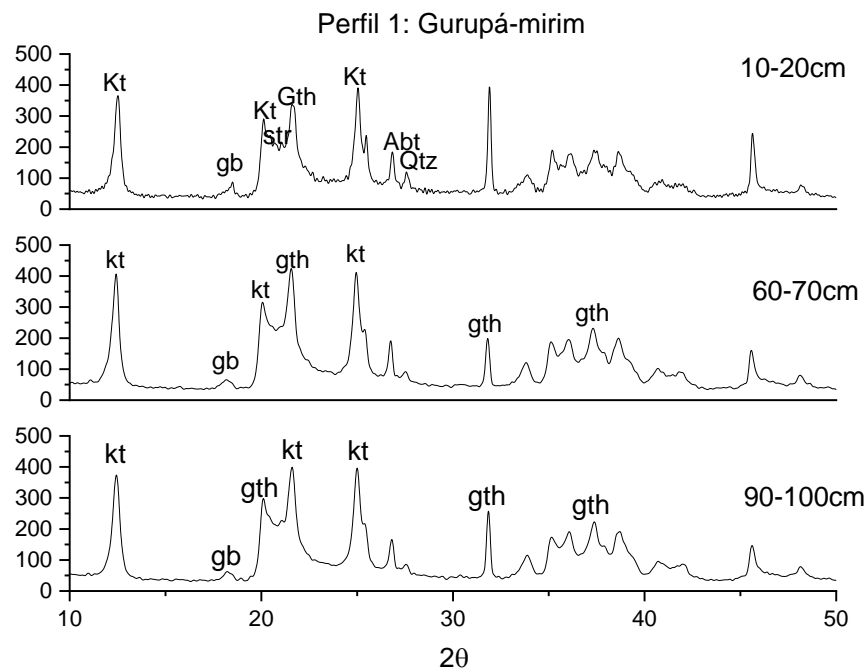


Figura 5: Dados de mineralogia do perfil no sítio arqueológico Carrazedo.

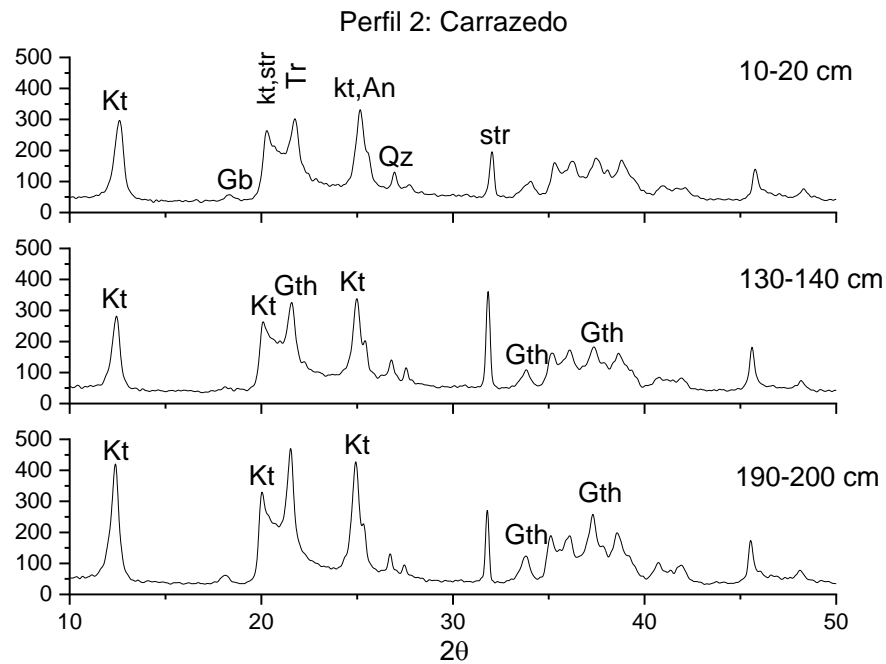
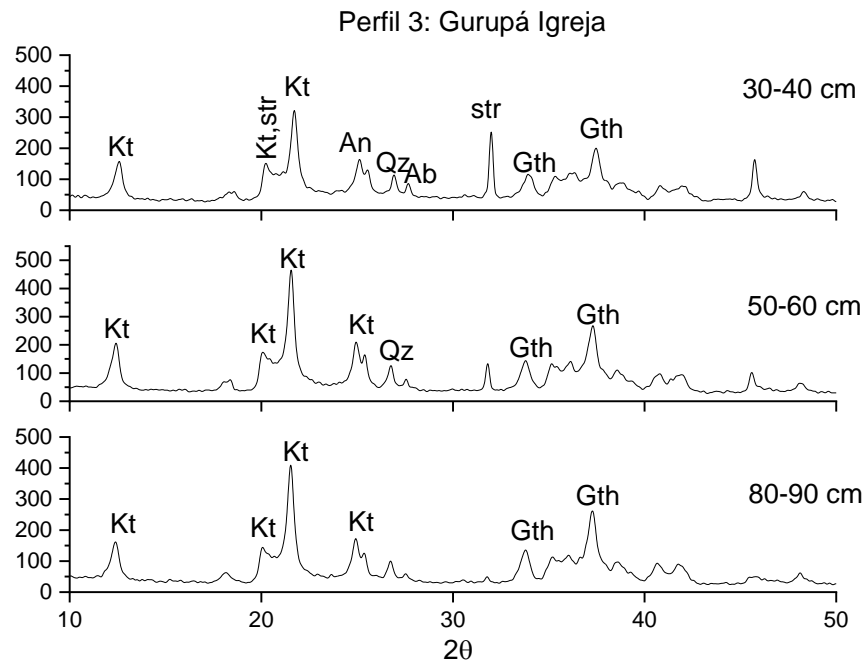


Figura 6: Dados de mineralogia do perfil no sítio arqueológico Gurupá – Igreja.



Os diferentes minerais apareceram nas profundidades iniciais na Figura 4: em 20 cm; na Figura 5: 20 cm e Figura 6: 40 cm. Em relação aos argilominerais, a caulinita (Kt) foi o mineral predominante em todos os perfis, com a presença da stringite (Str), albita (Ab), gibbsita (Gb), anatase (An), tridymite (Tr). Nos três perfis a partir da profundidade de 60 cm, o mineral predominante foi a caulinita e goethita.

## 4.5 Discussão

### 4.5.1 Distribuição dos agregados e sua relação com o carbono orgânico

Os agregados maiores ficaram retidos na classe 4,76 mm em todas as localidades, exceto a localidade 4 (Tabela 1), onde nota-se a quantidade de agregado na classe 0,250 mm, caracterizando como micro agregado, comportamento esse que se relaciona com a quantidade de matéria orgânica no solo, e que corrobora com os dados de carbono orgânico e estoque de carbono (Figura 3). Essa relação foi observada por (FROZZI et al., 2020), referindo-se claramente à estreita relação entre carbono orgânico e DMP.

Os altos níveis de CO e à intensa atividade biológica de microrganismos e raízes que promovem a construção de canais e bioporos, alteram a estrutura do solo. Além disso, a estabilidade do agregado do solo é um indicador significativo bem reconhecido de formação, degradação e estabilização da estrutura do solo (ABIVEN; MENASSERI; CHENU, 2009; ABRAR et al., 2020; MUSTAFA et al., 2020)

O carbono orgânico está presente em ambas as localidades (figura 3). Uma das principais peculiaridades dos solos de terra preta na Amazônia brasileira e a predominância de altos teores de matéria orgânica nos primeiros centímetros da camada superficial do solo.

De acordo com o (KERN et al., 2019; KÖGEL-KNABNER; AMELUNG, 2021), a quantidade de matéria orgânica do solo presente nas TPA, está relacionada a recalcitrância química, que contribui para o grau de condensação do carbono orgânico, conseqüentemente o aumento do estoque de carbono como mostra a (Figura 3B). Ainda segundo o autor, a maior concentração de carbono orgânico está presente superficialmente e diminui com a profundidade em 20cm (ALBERTO QUESADA et al., 2020; MACHADO et al., 2017; SANTANA MACEDO et al., 2019). Esse estoque de carbono geralmente eleva com o número de ácido carboxílico (qualidade de MO), aumentado ainda mais o grau de condensação (quantidade de MO) (GMACH et al., 2020; MAYER et al., 2019; MIKUTTA et al., 2006)

Segundo Batistão et al. (2020), o carbono orgânico é composto por cadeias aromáticas orgânicas e inorgânicas, ácidos bezenocarboxílico, resistente por um longo período de tempo e que tem grande atuação na formação da estabilização dos agregados do solo, fazendo com que melhores as condições física estrutural do solo (CAVASSANI et al., 2021).

### 4.5.2 Relação entre carbono orgânico e nutrientes do solo

Os teores de carbono orgânico nos solos antrópicos tropicais são maiores do que nos solos adjacentes, esse fenômeno também foi encontrado por (CORRÊA; SCHAEFER; GILKES, 2013; GLASER et al., 2000), referindo claramente a um enriquecimento na matéria orgânica do solo devido a adições antrópicas.

Com o enriquecimento do COT, os solos antrópicos apresentam quantidades consideravelmente maiores de P e Ca e Mg. Esse enriquecimento provavelmente resultaram de atividades antrópicas de longo prazo e uma baixa translocação de P em solos antrópicos kern et al., 2019. Isso demonstram evidências distintas de atividades antrópicas anteriores, logo, os limiares de P são necessários como critério de diagnóstico ou pelo menos, como característica adicional para classificar e identificar os solos de terra preta.

Os elementos P e Ca que são elementos limitantes em ambiente tropicais em comparação com solos de terra preta. De acordo com Silva 2021, esses elementos em excesso podem explicar possivelmente a origem dos solos de TPA. A capacidade de troca catiônica (CTC) indica grande capacidade de sorção catiônica, estoque de nutrientes (KERN et al., 2019; LIANG et al., 2006), e isso se justifica pelos valores encontrado na (tabela 2).

#### 4.5.3 Mineralogia da fração argila

A predominância caulínica (Kt) nos três perfis analisados era esperada, uma vez que os solos encontram-se em ambientes tropicais Amazônicos, cujo ambiente favorecem a lixiviação dos cátions básicos e de sílica, permitindo a formação e estabilização da Kt nesse ambiente, corroborando com resultados encontrados por Silva et al. (2011), que ao caracterizar a química e a mineralógica de solos antrópicos, observaram em solos de terra preta a goethita, gibbsita e anatásio. Já (NEGREIROS et al., 2020), destacaram em seu trabalho a presença de caulinita e quartzo, ilita e anatásio. E (SANTOS et al., 2018), mostraram que a caulinita foi o mineral predominante na fração argila para todos os solos antropogênicos avaliados, e que a presença desse mineral significa uma indicativa de alteração.

Os resultados encontrados neste estudo, de modo geral, apresentaram semelhança com predomínio de minerais ligados a terra preta na superfície do solo como Strangite (str), Albita (Ab), anatase (An), tridymite (Tr), e não encontrado em profundidade.

## 4.6 Conclusão

A estabilidade de agregado é maior na superfície do solo por ter forte relação com o teor e estoque de carbono orgânico do solo, demonstrando comportamento semelhantes entres as localidades, exceto na localidade L4.

Os solos de TPA apresentam enriquecimento de cálcio e fósforo e pH em relação a solos adjacentes, ganhando uma característica que possa identificar outros sítios de terra preta arqueológica, mostrando, assim, que a influência antrópica altera o ambiente.

A mineralogia da argila apresenta os minerais pertencentes nos solos de terra preta concentrados nos primeiros centímetros da superfície do solo e, de acordo com o aumento da profundidade, o mineral caulinita e goethita prevalece.

#### 4.7 Referências

ABIVEN, S.; MENASSERI, S.; CHENU, C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 1, p. 1–12, 2009.

ABRAR, M. M. et al. Variations in the profile distribution and protection mechanisms of organic carbon under long-term fertilization in a Chinese Mollisol. **Science of the Total Environment**, v. 723, p. 13. 2020.

ALBERTO QUESADA, C. et al. Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations. **SOIL**, v. 6, n. 1, 2020.

ALMEIDA, BRIVALDO GOMES DE et al. Densidade do solo. In: TEIXEIRA, P. C. et al. (Eds.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3ª edição ed. Brasília, DF: [s.n.]. p. 65–75. 2017.

BATISTÃO, A. C. et al. Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil. **Geoderma**, v. 363, n. July 2019, p. 114130, 2020.

CAVASSANI, R. DE S. et al. Amazonian dark earths in Rondônia state: Soil properties, carbon dating and classification. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. 1-24 2021.

CORRÊA, G. R.; SCHAEFER, C. E.; GILKES, R. J. Phosphate location and reaction in an archaeoanthrosol on shell-mound in the Lakes Region, Rio de Janeiro State, Brazil. **Quaternary International**, v. 315, p. 16–23, 2013.

DONAGEMMA, G. K. et al. Análise granulométrica. In: **Manual de métodos de análise de solo**. [s.l: s.n.]. p. 437. 2017.

FROZZI, J. C. et al. Physical attributes and organic carbon in soils under natural and anthropogenic environments in the South Amazon region. **Environmental Earth Sciences**, v. 79, n. 11, p. 1–15, 2020.

GHILARDI, M. Geoarchaeology: Where geosciences meet the humanities to reconstruct past human–environment interactions. an application to the coastal areas of the largest mediterranean islands. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 10, p. 1-27, 2021.

GLASER, B. et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of .pdf. **Organic Geochemistry**, v. 31, p. 669–678, 2000.



GMACH, M. R. et al. Processes that influence dissolved organic matter in the soil: a review. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 3, p. 1-10, 2020.

KERN, J. et al. What can we learn from ancient fertile anthropic soil (Amazonian Dark Earths, shell mounds, Plaggen soil) for soil carbon sequestration? **Catena**, v. 172, n. February 2018, p. 104–112, 2019.

KÖGEL-KNABNER, I.; AMELUNG, W. Soil organic matter in major pedogenic soil groups. **Geoderma**, v. 384, n. March 2020, 2021.

LIANG, B. et al. Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 5, p. 1-12, 2006.

LOMBARDO, U., Iriarte, J., Hilbert, L. et al. Early Holocene crop cultivation and landscape modification in Amazonia. **Nature**. v. 581, p. 190–193, 2020.

MACEDO, R. S. et al. Pedogenetic processes in anthrosols with pretic horizon (Amazonian Dark Earth) in Central Amazon, Brazil. **PLoS ONE**, v. 12, n. 5, p. 1–19, 2017.

MACHADO, M. R. et al. <b>Land cover changes affect soil chemical attributes in the Brazilian Amazon. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 39, n. 3, p. 385-391, 2017.

MAYER, S. et al. Controlling factors of organic carbon stocks in agricultural topsoils and subsoils of Bavaria. **Soil and Tillage Research**, v. 192, n. January, p. 22–32, 2019.

MIKUTTA, R. et al. Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance? **Biogeochemistry**, v. 77, n. 1, p. 25–56, 2006.

MUSTAFA, A. et al. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China. **Journal of Environmental Management**, v. 270, n. February, p. 1-11, 2020.

NEGREIROS, R. DE S. et al. Caracterização mineralógica de terra preta das Comunidades do Marajó e Gregostone, em Parintins, Amazonas, Brasil / Mineralogical characterization of black earth from the Marajó and Gregostone communities, in Parintins, Amazonas. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 5, p. 2882–2894, 2020.

NEJMAN, L. et al. Cave deposits as a sedimentary trap for the Marine Isotope Stage 3 environmental record: The case study of Pod Hradem, Czech Republic. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 497, p. 201-217, 2018.

NEJMAN, L. et al. Preliminary report of the 2019 excavation at švédův stůl cave in the Moravian Karst. **Prehled Vyzkumu**, v. 61, n. 1, p. 11–19, 2020.

SALISBURY, R. B. Advances in archaeological soil chemistry in Central Europe. **Interdisciplinaria Archaeologica**, v. 11, n. 2, p. 199-211, 2020.

SALTON, J. C. et al. Agregação do solo e estabilidade de agregados. In: TEIXEIRA, P. C. et al. (Eds.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília, DF: [s.n.]. p. 129–138. 2017.

SANTANA MACEDO, R. I. et al. Amazonian dark earths in the fertile floodplains of the

Amazon River, Brazil: an example of non-intentional formation of anthropic soils in the Central Amazon region Terra Preta de Índio em várzeas eutróficas do rio Solimões, Brasil: um exemplo da não int. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Hum**, v. 970, n. 1, p. 207–227, 2019.

SANTOS, L. A. C. DOS et al. Pedogenesis in an Archaeological Dark Earth – Mulatto Earth Catena over Volcanic Rocks in Western Amazonia, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, n. 0, p. 1–18, 2018.

SILVA, L. C. R. et al. A new hypothesis for the origin of Amazonian Dark Earths. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 1-11, 2021.