

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DA TERRA PRETA  
ARQUEOLÓGICA AMAZÔNICA**

**Ivanildo Amorim de Oliveira**

Engenheiro Agrônomo

2017

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DA TERRA PRETA  
ARQUEOLÓGICA AMAZÔNICA**

**Ivanildo Amorim de Oliveira**

**Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior**

**Coorientador: Prof. Dr. Milton César Costa Campos**

**Coorientador: Dr. Diego Silva Siqueira**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo)

**2017**

O48s Oliveira, Ivanildo Amorim de  
Suscetibilidade magnética da Terra Preta Arqueológica / Ivanildo  
Amorim de Oliveira. -- Jaboticabal, 2017  
xix, 85 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017  
Orientador: José Marques Júnior  
Banca examinadora: Livia Arantes Camargo, Marcílio Vieira  
Martins Filho, Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Zigomar Menezes de  
Souza

Bibliografia

1. Magnetismo. 2. Mineralogia. 3. Terra Preta de Índio. I. Título. II.  
Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.44:549

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da  
Informação – Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de  
Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal




## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DA TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA  
AMAZÔNICA

**AUTOR: IVANILDO AMORIM DE OLIVEIRA**  
**ORIENTADOR: JOSÉ MARQUES JUNIOR**  
**COORIENTADOR: MILTON CESAR COSTA CAMPOS**  
**COORIENTADOR: DIEGO SILVA SIQUEIRA**


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA  
(CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

  
 Prof. Dr. JOSÉ MARQUES JUNIOR  
 Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
 Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO  
 Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

*Livia Arantes Camargo*  
 Pós-doutoranda LIVIA ARANTES CAMARGO  
 Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
 Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA  
 Departamento de Água e Solo / Universidade Estadual de Campinas - Campinas/SP

  
 Prof. Dr. RICARDO SIMÃO DINIZ DALMOLIN (Participação por Videoconferência)  
 Departamento de Solos e Adubos / Universidade Federal de Santa Maria / Santa Maria/RS

Jaboticabal, 06 de abril de 2017.

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

IVANILDO AMORIM DE OLIVEIRA – nascido no dia 24 de junho de 1988 em Jaru – RO, graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal do Amazonas – Câmpus de Humaitá, AM (2012). Foi bolsista de iniciação científica no período de 2008 a 2011. Fez Mestrado no programa de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo pela FCAV/UNESP Jaboticabal (Bolsista da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM). Aluno de Doutorado do programa de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo pela FCAV/UNESP Jaboticabal (Bolsista durante 2 anos e 7 meses da FAPEAM). Nesse período, participou de 5 projetos e publicou 35 artigos, sendo 11 sobre Terra Preta de Arqueológica. Atualmente é professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do Instituto Federal do Pará-Câmpus Breves, Breves, PA, Brasil. Membro do grupo de pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP Câmpus de Jaboticabal e do grupo de pesquisa Marajó Sustentável, Educação e Tecnologia.

*“Aplica teu coração ao ensino e teus ouvidos às  
palavras que trazem conhecimento.”*

*(Provérbios 23:12)*

## DEDICO

A Ludmila de Freitas, pelo companheirismo, força, apoio, dedicação e cuidados que foram fundamentais para alcançar mais este grandioso e importante objetivo.

## OFEREÇO

A minha família, especialmente ao meu pai Ivanilson Teixeira de Oliveira, minha mãe Ivete Silva de Amorim Oliveira, meus irmãos Ivanilde Amorim de Oliveira e Idenildo Amorim de Oliveira que mesmo distantes, me deram incentivo e carinho em todos os dias da minha vida. Não esquecerei todo apoio!

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pois se não fosse por ele nada disso seria possível.

Aos meus pais, irmãos e todos familiares pela força e incentivo na elaboração deste trabalho.

A Ludmila de Freitas, pelo carinho e atenção nos momentos mais difíceis.

A Universidade Estadual Paulista pela oportunidade.

Ao Prof. José Marques Júnior pela oportunidade, orientação e disposição durante a realização do curso e deste trabalho.

Ao Prof. Milton César Costa Campos pelas correções e sugestões referentes ao trabalho e pelo incentivo desde a graduação, para minha permanência na carreira acadêmica.

Ao Prof. Diego Silva Siqueira pelas ideias, dicas, puxões de orelha e incentivo desde os primeiros dias em que fiz parte da família CSME.

Aos Professores Zigomar Menezes de Souza, Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Livia Arantes Camargo e Marcílio Vieira Martins Filho pela contribuição na banca de avaliação do trabalho.

Ao meu grande amigo Laércio Santos Silva... o filho, o “pequeno” e o irmão que Deus me deu a oportunidade de conhecer nestes anos de Doutorado. Obrigado Amigo!

Aos professores do departamento de solos e adubos e a todos os professores que ministraram disciplinas no decorrer do curso.

À Fundação de Amparo à pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM-pela concessão da bolsa de estudos.

Aos amigos do Grupo CSME, pelo incentivo, ensinamentos e trabalhos em equipe. “Um grande orgulho ser CSMEANO”.

Aos amigos Renato Eleotério de Aquino, Ederlon Flávio da Veiga Moline, Eliza Barboza, Aluísio Togoro, Juliana Silva, Junno, Vinícius e Jordana Flores pelo apoio e aqueles momentos de distração nestes anos de doutorado.

A Ana Beatriz e Renato Aquino Luis Antônio, por cederem parte dos resultados das análises físicas e mineralógicas dos perfis com TPAs.

Aos colegas de laboratório do IEAA/UFAM e UNESP pela força nas análises laboratoriais.

Aos colegas do IFPA Campus Breves, pelo apoio e incentivo nestes últimos meses de trabalho.

A todos os meus amigos e colegas dentro e fora da Universidade. O meu muito obrigado!

**SUMÁRIO**

LISTAS DE ABREVIATURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
CAPÍTULO 1 - Considerações gerais.....	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2. Revisão de literatura.....	3
1.2.1 Formação da Terra Preta Arqueológica – influência antrópica.....	3
1.2.2 Suscetibilidade magnética em Terras Pretas Arqueológicas: indicador de transformações.....	6
1.3 REFERÊNCIAS.....	9
CAPÍTULO 2 – Uso da suscetibilidade magnética na identificação de ambientes pedogenéticos em Terras Pretas de Arqueológicas na região sul do Amazonas.....	15
2.1 INTRODUÇÃO.....	16
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
2.4 CONCLUSÕES.....	36
2.5. REFERÊNCIAS.....	37
CAPÍTULO 3 – Magnetismo da Terra Preta Arqueológica como indicador agrícola e ambiental.....	41
3.1 INTRODUÇÃO.....	42
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	44
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
3.4 CONCLUSÕES.....	65
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
3.6 REFERÊNCIAS.....	66

# SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DA TERRA PRETA ARQUEOLÓGICA AMAZÔNICA

**RESUMO** - O trabalho fornece informações sobre a formação da Terra Preta Arqueológica e sua relação com a expressão magnética proveniente de minerais litogenéticos, pedogenéticos e influência antrópica. Os resultados da presença de minerais ferrimagnéticos nos solos de Terra Preta Arqueológica (TPA) pode ser utilizada para compreender o processo de formação destes solos ou utilizar a expressão magnética como indicador agrícola para cultivo nestes solos. O trabalho possui dois objetivos: (i) verificar as influências geológicas, pedogenéticas e antrópicas na suscetibilidade magnética (SM) da TPA e (ii) estudar o potencial da SM como indicadora agrícola e ambiental para cultivo nestes solos. Foram abertos treze perfis com TPA e um perfil de floresta (solo não antropogênico), sendo coletadas amostras por horizonte em cada perfil. Próximo de um dos perfis com TPA foi estabelecido uma malha de 70 x 70 m e coletada amostras de solos em espaçamentos regulares de 10 m na profundidade de 0,0-0,20 m. Nas amostras coletadas, realizou-se a análise textural, fertilidade e análises mineralógicas. A SM foi determinada nos solos, nas cinzas das plantas e fragmentos de cerâmica encontradas nas TPAs. Na malha, também foi determinado o fluxo de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>), temperatura e umidade. Há uma grande diversidade de minerais nas TPA, entre eles destacam-se: goethitas (0,16 a 21,86 g kg<sup>-1</sup>), hematitas (0,27 a 45,14 g kg<sup>-1</sup>), e maghemita (em baixas concentrações). A SM foi maior nos horizontes antrópicos dos perfis com TPA (6,49 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>) diminuindo em profundidade (0,15 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>). Nos perfis com terra preta arqueológica, a SM é maior que em subsuperfície, sendo esse comportamento contrário no solo não antropogênico, pois estes não sofrem influência do fogo e de minerais magnéticos presentes nos fragmentos de cerâmica. O estudo de variabilidade espacial mostrou que a SM pode ser utilizada no entendimento do potencial agrícola e ambiental em TPA. Locais com maior SM (4,7 a 5,1 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>) apresentaram 1,2 vezes mais CTC e emitiram 1,4 vezes menos CO<sub>2</sub> em comparação a áreas com menores valores magnéticos (3,5 a 3,9 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>). Os resultados das relações de causa e efeito entre mineralogia e SM encontrados neste trabalho possam ajudar tanto na compreensão de processos naturais de formação da TPA quanto em processos antrópicos.

**Palavras-chave:** magnetismo, mineralogia, terra preta de índio.

## MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF ARCHEOLOGICAL BLACK EARTH AMAZON

**ABSTRACT** - The study provides information about the formation of archeological black earth and relation with magnetic expression from lithogenic, pedogenic and anthropogenic minerals. The results of the presence of ferrimagnetic minerals in archeological black earth (ABE) soils can be used to understand the process of formation of these soils or to use magnetic expression as an agricultural indicator for cultivation in these soils. The study has two objectives: i) to verify the geological, pedogenetic and anthropogenic influences on the magnetic susceptibility (MS) of archeological black earth (ii) to study the potential of MS as agricultural and environmental indicator for cultivation in these soils. Thirteen archeological black earth profiles and a forest profile (non-anthropogenic soil) were opened, and samples were collected per horizon in each profile. Next to one of the profiles with ABE a grid of 70 m x 70 m was established and soil samples were collected at regular spaced every 10 m at the depth of 0.0-0.20 m. The samples collected determine the textural, fertility and mineralogical analyzes. The MS was determined in soils, in the ashes of plants and ceramic fragments found in ABE. In the grid, the CO<sub>2</sub> flux (FCO<sub>2</sub>), temperature and moisture was also determined. There is a high diversity of minerals in archeological black earth, among them goethites (0.16 to 21.86 g kg<sup>-1</sup>), hematite (0.27 to 45.14 g kg<sup>-1</sup>), and maghemite (In low concentrations). The MS was higher in the anthropic horizons of the profiles with ABE (6.49 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>) decreasing in depth (0.15 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>). In the profiles with archeological black earth, the MS is greater than in subsurface, and this behavior is contrary to the non-anthropogenic soil, since these are not affected by the fire and the magnetic minerals present in the ceramic fragments. The study of spatial variability showed that MS can be used in understanding the agricultural and environmental potential in ABE. Sites with higher MS (4.7 to 5.1 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>) presented 1.2 times more CTC and emitted 1.4 times less CO<sub>2</sub> compared to areas with lower magnetic values (3.5 to 3.9 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>). The expect the results of cause and effect relationships between mineralogy and MS found in this study can help both in understanding of natural processes of archeological black earth formation and in anthropic processes.

**Keywords:** magnetism; mineralogy, indian black earth.

**Listas de Abreviaturas**

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxidos do ataque sulfúrico – óxidos de alumínio
CTC	Capacidade de troca de cátions
FCO <sub>2</sub>	Fluxo de CO <sub>2</sub>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,	Óxidos do ataque sulfúrico – ferro total
Fed	Ferro ditionito
FeDBC	Teores de ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed)
Feo	Ferro oxalato
FeOAA	Teores de ferro extraídos por oxalato de amônio (Feo)
Gt	Goethita
Hm	Hematita
Mh	Maghemita
MO	Matéria orgânica
SB	Soma de bases
SiO <sub>2</sub> ,	Óxidos do ataque sulfúrico – óxidos de silício
SM	Suscetibilidade magnética
SMaf	Suscetibilidade magnética em alta frequência
SMbf	Suscetibilidade magnética em baixa frequência
T° C	Temperatura do solo
TPA	Terra Preta Arqueológica
TPI	Terra Preta de Índio
Us	Umidade do solo
V%	Saturação por bases
χ <sub>fd</sub>	Porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente

**Lista de Tabelas****Capítulo 1**

Tabela 1. Composição mineralógica de fragmentos cerâmicos e materiais utilizados.	9
---	---

**Capítulo 2**

Tabela 1. Localização dos perfis estudados na região Sul do Amazonas.....	19
Tabela 2. Teores dos atributos dos solos com terra preta arqueológica e floresta. .	21
Tabela 3. Classificação dos valores da $\chi_{fd}$ . .....	23
Tabela 4. Teores de atributos dos solos com terra arqueológica arqueológica e floresta. ....	26

**Capítulo 3**

Tabela 1. Caracterização física e química do solo e estatística descritiva. ....	47
Tabela 2. Caracterização espacial de atributos físicos e químicos .....	48
Tabela 3. Estatística descritiva dos atributos do solo em área de terra preta arqueológica. ....	51

## Lista de Figuras

### Capítulo 1

- Figura 1. Análise bibliométrica dos termos “Soil archeological black” na base de dados SCOPUS (pesquisa realizada em 2 de julho de 2016)..... 6
- Figura 2. Vias de formação e transformação dos óxidos de ferro. .... 8

### Capítulo 2

- Figura 1. Mapa com localização dos perfis de solos no município de Apuí e Santo Antônio do Matupí, no Estado do Amazonas. .... 18
- Figura 2. Ensaio para avaliação do comportamento magnético das cinzas de plantas de ciclo fotossintético C3 e C4 e fragmentos de cerâmica com ocorrência em áreas de TPA. .... 24
- Figura 3. Análises dos atributos FeDBC (em %), FeOAA (em %), ferro total (em %), SMbf - suscetibilidade magnética em baixa frequência ( $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) e porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente ( $\chi_{fd}$ ) de todos os perfis com terra preta arqueológica e solo adjacente (floresta). .... 27
- Figura 4. Caracterização dos óxidos de ferro da fração argila em terra preta arqueológica.. .... 29
- Figura 5. Relação entre a profundidade do solo (cm) e a porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente ( $\chi_{fd}$ ). .... 31
- Figura 6. Suscetibilidade magnética em baixa frequência (SMbf) e porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente ( $\chi_{fd}$ ) das cinzas de plantas de ciclo fotossintético C3 e C4 e fragmentos de cerâmica com ocorrência em áreas de terra arqueológica. .... 34

### Capítulo 3

- Figura 1. Mapa de localização e modelo de elevação digital da área de estudo. .... 45
- Figura 2. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos do solo em área com Terra Preta Arqueológica no Município de Manicoré, Amazonas. [modelo (efeito pepita - patamar - GDE -  $R^2$  - alcance - resíduo)]. Esf. - Esférico; GDE - grau d de dependência espacial;  $R^2$  - coeficiente de determinação 55
- Figura 3. Semivariogramas cruzados da SMbf e  $\chi_{fd}$  versus atributos agrícolas e ambiental do solo na terra preta arqueológica. (modelo;  $C_0$ ;  $C_0+C_1$ ; GDE;  $R^2$ ; a; Res); Esf. = Esférico;  $C_0$ = efeito pepita;  $C_0+C_1$ = patamar; GDE = grau de dependência espacial;  $R^2$  = Coeficiente de determinação; a = alcance; Res. = resíduo; EPP= efeito pepita puro; Ferro ditonito = FeDBC; Ferro oxalato = FeOAA. .... 57
- Figura 4. Correlação entre a SMbf e  $\chi_{fd}$  com os atributos agrícolas e ambiental do solo em área de terra preta arqueológica. .... 60
- Figura 4. Mapas de variabilidade espacial e erro relativo dos atributos físicos, químicos, magnéticos e formas de ferro do solo em área de terra preta arqueológica. .... 63

## **CAPÍTULO 1 - Considerações gerais**

### **1.1 INTRODUÇÃO**

A Amazônia apresenta a ocorrência de solos antrópicos com características peculiares, conhecidos como Terra Preta de Índio (TPI) ou Terra Preta Arqueológica (TPA), e evidencia importante registro da ocupação humana e do uso do solo da região (LIMA, 2001; LIMA et al., 2002). Essas TPAs são horizontes localizados na superfície de vários solos na região, como Argissolos, Neossolos, Latossolos, Cambissolos, Plintossolos e Espodossolos (LIMA, 2001, KERN et al., 2003), os quais apresentam alta fertilidade natural (LEHMANN et al., 2003, GLASER, 2007), normalmente associados a corpos d'água ou terrenos com maiores cotas de altitude. A característica marcante é a coloração escura e presença de fragmentos de cerâmica e/ou líticos incorporados na matriz dos horizontes superficiais, possivelmente deixados por tribos indígenas que habitavam estes locais (KAMPF; KERN, 2005).

Algumas pesquisas vêm tentando elucidar a formação das TPAs e atualmente, há dois modelos que procuram explicar o processo de formação destas: i) a hipótese antrópica, onde evidências pedológicas e arqueológicas estudadas por Kern e Kampf (1989) sugerem que estas teriam sido formadas não intencionalmente pelo homem pré-colombiano, sendo sua formação resultado do efeito colateral ao estilo de vida adotado por esta sociedade; e ii) hipótese antropogênica, estes solos surgiram nos antigos campos de lavoura dos povos indígenas pré-colombianos, como resultado de uma intervenção planejada. Além disso, acredita-se que a densidade populacional e as atividades concentradas, foram os fatores primários na formação das TPAs (NEVES et al., 2003). Dentre as formas de uso e manejo do solo, pode-se destacar a utilização do fogo, o qual foi um componente crucial na formação das TPAs por contribuir na forma de carvão e cinza.

Apesar de estudos de caracterização (CAMPOS et al., 2013; AQUINO et al., 2016), e variabilidade espacial de atributos das TPAs (AQUINO et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2015a, CAMPOS et al., 2016), tais pesquisadores não se atentaram com o efeito desta na natureza. Os cientistas só passaram a ter interesse cerca de uma década, quando a crescente preocupação com o aquecimento global, levou-os a questionar sobre como estes solos podem armazenar grandes

quantidades de carbono no solo, em decorrência aos elevados teores de matéria orgânica (MO) encontrado nestes solos com a presença de TPA.

Dentro deste contexto, é possível destacar que a composição física, química e mineralógica das TPAs podem ter sofrido influência antrópica. Diante do exposto, a suscetibilidade magnética (SM) que reflete parte da composição mineralógica do solo (SOUZA JÚNIOR et al., 2010) e corresponde a razão entre a magnetização e o campo magnético aplicado, ganha importância como técnica vantajosa para a detecção da possível presença de minerais no solo. Além disso, pode auxiliar no entendimento de atributos agrícolas e ambientais de TPAs, visto que estes solos são altamente diferentes de solos adjacentes formados em condições naturais.

As TPAs apresentam alta variabilidade dos atributos (AQUINO et al., 2015), sendo explicado pela presença de fragmentos cerâmicos e material lítico (CAMPOS et al., 2011), uso intenso do fogo associado à deposição de material orgânico que forma partículas organominerais estáveis semelhantes à fração areia (TEIXEIRA et al., 2009). Neste sentido, o uso da SM é importante para a compreensão dos atributos destes solos nas caracterização destes ambientes. Assim, esta técnica torna-se viável por ser barata, segura, simples e rápida no estudo de atributos dos solos, como a presença e o teor de óxidos de ferro ferrimagnéticos nos solos e sedimentos, além de elucidar o grau de evolução destes nos processos pedogenéticos (COSTA et al., 1999; DEARING, 1999; LU et al., 2008).

A SM também tem sido utilizada para auxiliar no entendimento das rotas de transformação de minerais de óxidos de ferro nas regiões temperada e tropical (TORRENT; LIU; BARRÓN, 2010; CAMARGO et al., 2014; SIQUEIRA et al., 2015; CAMARGO et al., 2016). Pelo exposto, a SM pode ajudar na compreensão de diferentes fontes de variação da mineralogia dos solos temperados e tropicais como: influência geológica (FONTES et al., 2000; DUNSHENG et al., 2007), litogenética (BARRÓN; TORRENT, 2013; CAMARGO et al., 2014) antropogenética por meio do fogo (MULLINS, 1977; SCHWERTMANN; CORNELL, 1991; SPOKAS et al., 2015) e a contribuição do biomagnetismo das plantas (HOUYUAN; DONGSHENG, 2001). Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo utilizar a SM como indicadora agrícola e ambiental e identificar a influência antrópica na formação de diferentes ambientes pedogenéticos de áreas com TPAs, na região Sul do Amazonas, Brasil.

## 1.2. REVISÃO DE LITERATURA

### 1.2.1 Formação da Terra Preta Arqueológica – influência antrópica

Os solos amazônicos, sob o ponto de vista agrônomo, são ácidos, saturados por alumínio tóxico e deficientes na maioria dos nutrientes minerais, fato que, segundo Meggers (1996), teriam sido uma limitação natural (determinismo ecológico) imposta ao desenvolvimento humano na Amazônia. As condições ambientais na Amazônia são muito diversificadas: a ampla diversidade das condições climáticas é acompanhada por variações na vegetação, nos tipos e nas propriedades dos solos (SOMBROEK, 2000).

Evidências arqueológicas indicam que atividades humanas antigas nos habitats amazônicos transformaram significativamente as paisagens na vizinhança dos seus assentamentos, notadamente no período pré-histórico tardio. Em muitas regiões, sociedades indígenas formaram extensos depósitos de resíduos, para muitos simplesmente rejeitos, que alteraram as propriedades do solo (LEHMANN et al., 2003), incrementando ou diminuindo suas aptidões. Dessa forma, solos com horizonte superficial antrópico, conhecidos como Terra Preta de Índio (TPI) ou Terra Preta Arqueológica (TPA) (KAMPF; KERN, 2005), representam um dos mais marcantes registros da antiga ocupação humana na região amazônica, e encontram-se distribuídos aleatoriamente, comumente localizados ao longo de rios e interflúvios, ocupando várzeas, elevações marginais adjacentes e terra firme.

Solos com TPA consistem em pequenas manchas escuras que podem variar de um hectare ou menos até várias centenas de hectares. Apresentam visível distribuição de fragmentos de cerâmica e artefatos líticos, cujas concentrações condicionam características físicas e hídricas específicas (PETERSEN; NEVES; HECKENBERGER, 2001), os quais são considerados peças-chave na busca de soluções para a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola na Amazônia. Estes solos via de regra apresentam altas concentrações de nutrientes, com elevados teores de fósforo, cálcio e alguns micronutrientes, como o manganês e o zinco, além de pH mais elevado, baixa saturação por Al e Fe, elevados níveis de capacidade de troca catiônica (CTC) (KERN; KAMPF, 1989).

As TPAs apresentam altos teores de matéria orgânica, superiores em até três vezes em relação aos solos adjacentes inférteis, provavelmente pelo manejo de

restos orgânicos de origem vegetal (folhas e talos de palmeiras diversas, cascas de mandioca e sementes) e de origem animal (ossos, sangue, gordura, fezes, carapaças de quelônios e conchas), e do fogo pelas populações pré-colombianas (KERN; COSTA, 1997), além das características mineralógicas desses solos orgânicos ou devido à presença de maior quantidade de carvão pirogênico (carvão vegetal). O carvão vegetal pode chegar a ser 70 vezes maior em relação aos solos de origem não antropogênica, onde ocorre rápida decomposição da matéria orgânica devido às altas temperaturas, precipitações elevadas e deficiência de minerais estáveis (MCCANN; WOODS; MEYER, 2001; GLASER, 2007).

Trabalhos com TPAs tiveram como objetivo a caracterização (CAMPOS et al., 2013; AQUINO et al., 2016), e a avaliação da variabilidade espacial de atributos de solos de solos com TPAs (AQUINO et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2015a, OLIVEIRA 2015b, CAMPOS et al., 2016), mas não se preocuparam com os efeitos das TPAs na natureza. Os cientistas só vieram ampliar seus interesses pelas TPAs há uma década, quando a crescente preocupação com o aquecimento global, observou-se que o “biochar” pode ser uma grande fonte de reserva de carbono no subsolo. Entretanto o biochar teve origem a partir da descoberta da TPA, por meio da realização de estudos em solos antropogênicos na Amazônia, sendo um subproduto da queima proposital ou não de matéria orgânica em condições mínimas de oxigênio (LEHMANN et al., 2003).

Em seu trabalho, Cernansky (2015), salienta que há milhares de anos, os moradores da Amazônia ao aquecer a matéria orgânica (MO), formaram solos ricos e férteis, chamados terra preta. A prática foi abandonada na época em que as nações européias invadiram a América do Sul, e relativamente poucos agricultores têm rotineiramente usado estes solos. Um foco particular das áreas de estudos do carvão presente nos solos sugere o efeito positivo dos carvões sobre propriedades físico-hídricas de solos (PICCOLO; PIETRAMELLARA; MBAGWU, 1996; TEIXEIRA et al., 2009), tal que a presença de fragmentos de carvão pirogênico pode aumentar significativamente a capacidade de retenção de água, especialmente em solos de textura arenosa, em função de sua estrutura altamente porosa, uma vez que cerca de 70 a 80 % do volume do carvão é formado por poros.

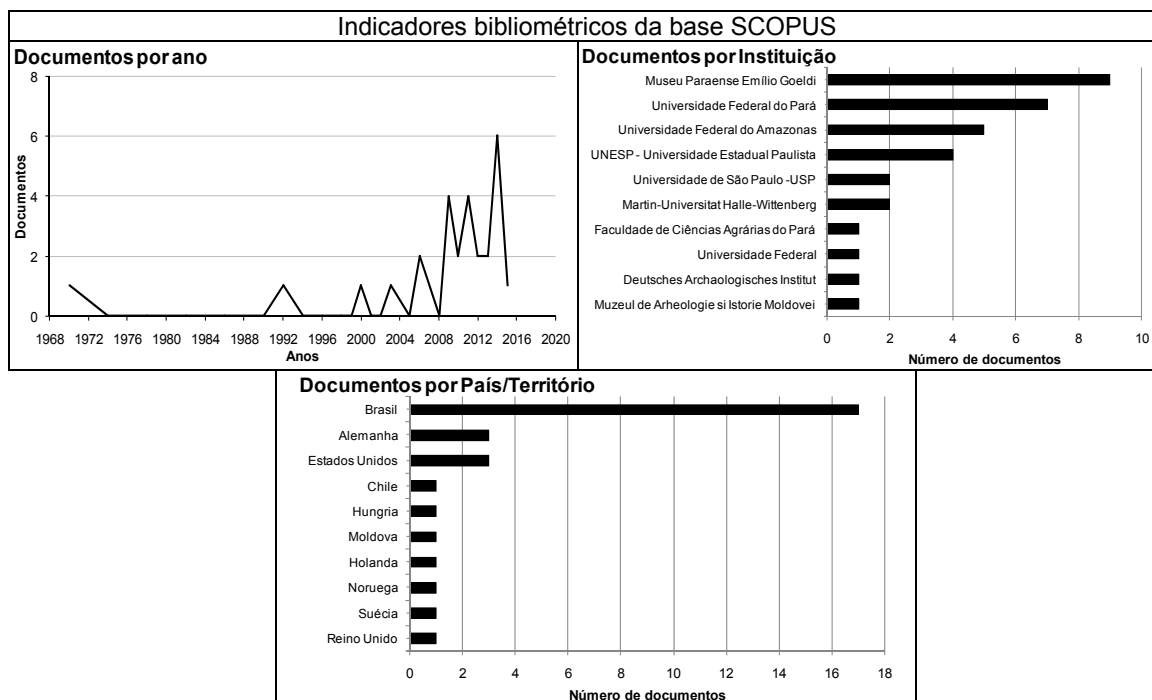
Alguns pesquisadores estão testando como o carvão pirogênico influencia a atividade microbiana no solo. A incorporação antrópica de fragmentos de carvão nas TPAs pode estar contribuindo para favorecer a atividade microbiana e reduzir a lixiviação de nutrientes, mantendo estável a fertilidade do solo e, conseqüentemente, a produtividade agrícola e a sustentabilidade (GLASER et al., 2003; STEINER et al., 2004). Comunidades microbianas do solo respondem de forma complexa ao fogo e à presença do carvão vegetal (PIETIKAINEN; KIIKKILA; FRITZE, 2000). A interação dos microrganismos com o carvão ainda não é bem compreendida, justificando a necessidade de estudos envolvendo a avaliação da estrutura de comunidades microbianas presentes neste micro-habitat e, ainda, o seu papel na manutenção das propriedades físicas, químicas e das características biológicas dos solos com TPA.

Sendo as TPAs, consideradas um biochar natural, segundo Lehmann e Joseph (2009), algumas pesquisas indicam que o uso do biochar tem potencial global de sequestro de CO<sub>2</sub> atmosférico na escala de bilhões de toneladas (109 t ano<sup>-1</sup>) no espaço de 30 anos. No entanto, até o presente, os resultados publicados refletem estudos de uso em pequena escala impedindo generalizações quanto a diferentes regiões geográficas (SOHI et al., 2009). O carvão vegetal se apresenta como um bom material para o alcance de um solo segundo o modelo TPA, pois apresenta grupos aromáticos condensados, que garantem a sua resistência à degradação química, ou recalcitrância, sendo potencialmente um eficiente material para sequestro de carbono. Tais propriedades, por sua vez, normalmente resultam em maior crescimento e produtividade vegetal.

As TPAs apresentam níveis elevados da maioria dos nutrientes essenciais ao crescimento das plantas, muito superiores aos níveis críticos para a maioria das plantas cultivadas na Amazônia, mesmo após longos períodos de cultivo. Dessa forma, tornou-se uma possibilidade de inovação para a melhoria do crescimento de plantas em diversos cultivos agrícolas e para o setor florestal, principalmente na subárea de viveiros florestais e recuperação de áreas degradadas. Por outro lado, a análise bibliométrica na base de artigos da SCOPUS indica aumento de pesquisas sobre os temas “soil archeological black” (terra preta arqueológica) (Figura 1).

É possível destacar o crescimento no quantitativo de publicações ao longo dos anos, sendo mais expressivo na última década para os termos *Soil archeological*

*Black*. O Brasil se destaca com o Museu Paraense Emílio Goeldi para o termo *Soil archeological Black* (Figura 1).



**Figura 1.** Análise bibliométrica dos termos “Soil archeological black” na base de dados SCOPUS (pesquisa realizada em 2 de julho de 2016).

### 1.2.2 Suscetibilidade magnética em Terras Pretas Arqueológicas: indicador de transformações

A SM é uma característica dos minerais presentes nas rochas e no solo, o qual pode ser definida como a medida da facilidade com que um material se magnetiza em presença de um campo magnético (VEROSUB; ROBERTS, 1995). Partindo deste princípio, pode-se afirmar que ela é afetada pelos mesmos fatores de formação do solo, ou seja, pelo clima (DEARING et al., 2001), material de origem (FONTES et al., 2000), relevo (JONG, PENNOCK; NESTOR, 2000) fauna/flora (DEARING; LEES; WHITE, 1995), entre outros. Nesse sentido, Schachtschabel et al. (1998) e Maher e Thompson (1991) afirmaram que a SM é sensível às variações dos fatores e processos de formação do solo, podendo ser expressa nas propriedades cristalográficas dos minerais presentes nos sedimentos e no solo.

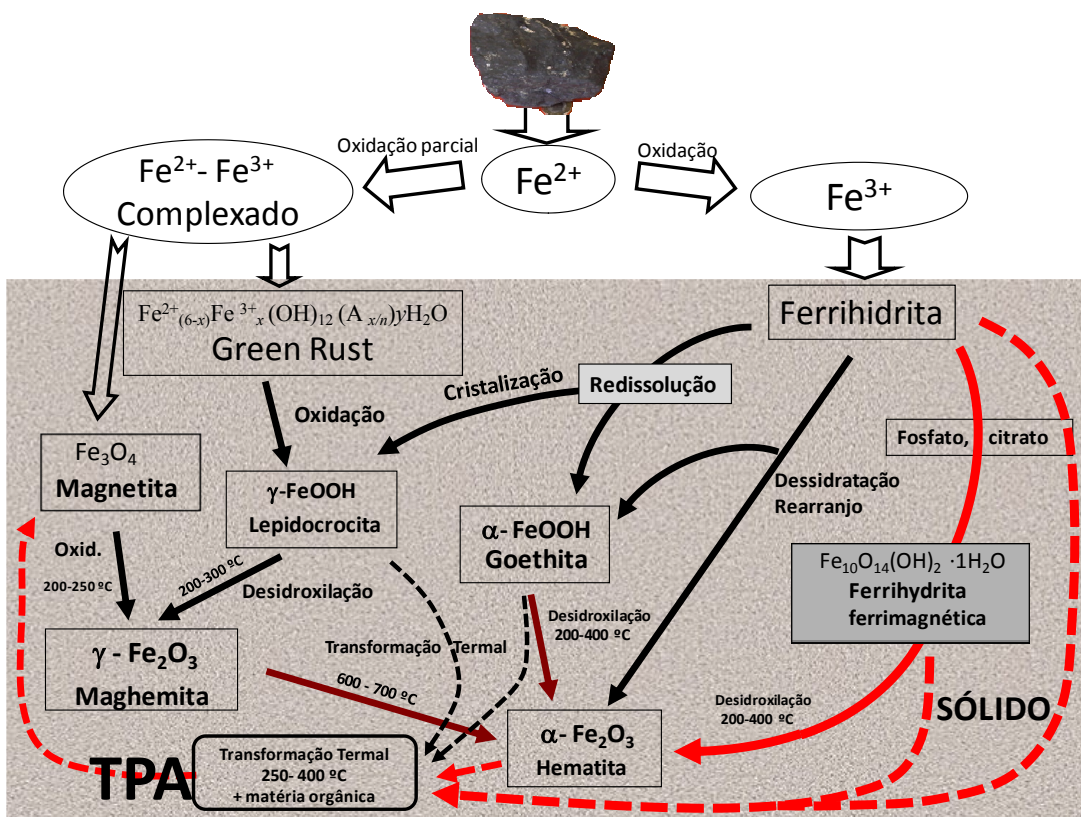
A mineralogia dos solos afeta diretamente as variações da SM nos solos. O modelo pedogênico atual de formação dos óxidos de ferro pressupõe,

essencialmente, através de dois mecanismos diferentes, a saber: (1) precipitação a partir de  $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{3+}$ , pelo efeito do intemperismo das rochas; e (2) a conversão de um precursor de óxido de Fe por dissolução/reprecipitação ou por via de um processo de estado sólido (CORNELL; SCHWERTMANN, 2003). A hidrólise, oxidação, desidratação, desidroxilação, redissolução e reações de cristalização potencialmente envolvidas compõem um cenário complexo, no qual a hematita (Hm) e goethita (Gt) são os óxidos de ferro mais comuns em virtude das suas maiores estabilidades termodinâmicas. O precursor destes minerais é frequentemente ferrihidrita, que pode ser convertida em Hm por agregação-desidratação-rearranjo ou em Gt por dissolução-reprecipitação (BIGHAM et al., 2002) (Figura 2).

Nos solos, altos valores da SM podem estar associados à presença do mineral litogenético magnético (RESENDE et al., 1988), enquanto que os valores magnéticos nos ambientes sedimentares estão associados a maior presença de minerais pedogenéticos, como a maghemita e a ferridrita ferrimagnética (DUNSHENG et al., 2007; TORRENT; LIU; BARRÓN, 2010). A literatura sugere que a formação destes óxidos de ferro magnéticos (maghemita) pode ocorrer através do aquecimento da lepidocrocita ( $\gamma\text{-FeOOH}$ ), 200 °C a 300 °C advinda da ferrihidrita, que após o aquecimento termal (fogo), produz diretamente maghemita (BARRÓN; TORRENT, 2013) (Figura 2). A formação da ferrihidrita ferrimagnética (superparamagnética), pode ter sua formação influenciada pela presença de citratos e fosfatos, que bloqueiam a ferrihidrita antes da formação de Hm (MICHEL et al., 2010; BARRÓN; TORRENT, 2013). Para Mullins (1977) e Schwertmann e Cornell (1991), outro mecanismo de formação de maghemita no solo é pela queima de outros óxidos de ferro, como a Gt e a Hm, na presença de material orgânico, sendo esta a rota de formação de minerais que mais explica a presença de minerais magnéticos nas TPAs (Tabela 1), conforme encontrado por Costa et al. (2004), uma vez que a presença de fogo era uma prática comum no processo de formação desses solos, conforme destacado na Figura 2.

Os vários destinos do íon ferro é determinado pelas condições do ambiente, como pH, potencial redox (Eh), temperatura, umidade, teor de matéria orgânica, composição da solução do solo e o estado de oxidação do ferro. O ferro pode recombinar-se com oxigênio formando grupos específicos denominados de óxidos,

hidróxidos ou oxihidróxidos, generalizados neste contexto como óxidos de ferro (Figura 2), os quais são estáveis em solos intemperizados (SCHULZE, 1989; SPOSITO, 1989). Estas condições ambientais, naturais ou não, formam os principais óxidos e hidróxidos de Fe encontrados no solo como a hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), goethita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), lepidocrocita ( $\gamma\text{-FeOOH}$ ), a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ferrihidrita ( $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) e a green rust ( $\text{Fe}^{2+}(\text{OH})_2\text{CO}_5(\text{H}_2\text{O})$ ) (Figura 2).



Fonte: Adaptado de Barron e Torrent (2013)

**Figura 2.** Vias de formação e transformação dos óxidos de ferro.

Além das aplicações em estudos da gênese de solos tropicais, a SM também está sendo utilizada e proposta como indicadora de uso e ocupação do solo, auxiliando no planejamento estratégico de áreas agrícolas para: conservação do solo (MARQUES JÚNIOR et al., 2013), aplicação de água residuária (PELUCO et al., 2013), respiração do solo (LEAL et al., 2015), uso racional do fósforo (MARQUES JÚNIOR et al., 2014; CAMARGO et al., 2016). A SM também foi utilizada para estudo de caracterização e variabilidade espacial, comparando área agrícola com TPA na Amazônia (OLIVEIRA et al., 2015a; OLIVEIRA et al., 2015b).

**Tabela 1.** Composição mineralógica de fragmentos cerâmicos e materiais utilizados.

Composição mineralógica	Cauixi <sup>1</sup>	Cariapé <sup>2</sup>	Areia
	-----%-----		
Quartzo	42,4	41,2	49,8
Caulinita	30,6	29,4	25,7
Maghemita	2,3	4,2	-
Hematita	4,3	8,2	4,4
Goethita	3,4	7,1	-
Anatásio	0,9	0,9	0,8

**Fonte:** COSTA et al., (2004). <sup>1</sup>= É um espongiário (*Tubella reticulata* e *Parnula betesil*) de água doce que se aloja nos galhos e troncos das árvores, de barcos e nos sedimentos de fundo de lagos, rios e é formada por SiO<sub>2</sub> amorfa; <sup>2</sup>= casca de árvore (*Bignoniacea*, *Moquilea*, *Licania utilis* e *Turiuva*) que também se constitui de SiO<sub>2</sub> amorfa.

Partindo do conhecimento da formação dos minerais nos solos, fica evidente que estes atributos devem ser considerados em pesquisas que visam estabelecer o potencial agrícola e ambiental de solos. Sendo assim, na ciência do solo, a SM pode ser usada como método alternativo para compreender os atributos do solo (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000). Este método pode facilitar o conhecimento sobre a variabilidade dos atributos do solo, sendo esta, útil para identificar o potencial agrícola podendo garantir o desenvolvimento de forma sustentável das práticas de manejo do solo (LÓPEZ, 2009).

Neste sentido, na avaliação quantitativa de atributos do solo, a coleta e análise das amostras são as etapas mais intensivas e onerosas (McBRATNEY et al., 2003). De acordo com Dearing et al. (1996), o uso da SM é ideal para a realização de estudos que requerem avaliação de grande quantidade de amostras de solo. Assim, pesquisadores têm apontado a SM (SIQUEIRA; MARQUES JUNIOR; PEREIRA, 2010) como um atributo importante para a quantificação indireta de propriedades químicas, físicas e mineralógicas do solo.

### 1.3 REFERÊNCIAS

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, I. A.; TEIXEIRA, D. B.; CUNHA, J. M. Use of scaled semivariograms in sample planning of soil physical attributes in Southern Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n.1, p. 21-30, 2015.

AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; BAHIA, A. S. R. S.; SANTOS, L. A. C. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. **Geoderma**, Amsterdam, v. 262, n.2, p. 35-44, 2016.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Iron, manganese and aluminium oxides and oxyhydroxides. In: NIETO, F; LIVI, K.J.T. **Minerals at the Nanoscale**. Twickenham: EMU Notes in Mineralogy, 2013. cap.9, p.297–336.

BIGHAM, J. M.; FITZPATRICK, R. W.; SCHULZE, D. Iron oxides. In: DIXON, J. B; SCHULZE, D. G. **Soil mineralogy with environmental applications**. Madison, Soil Science Society of America, 2002. p.323-366 (Book Series, 7).

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F.; BAHIA, A. S. R. S.; TEIXEIRA, D. D. B. Pedotransfer functions to assess adsorbed phosphate using iron oxide content and magnetic susceptibility in an Oxisol. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 32, 1 n.2, p.72–182, 2016.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JUNIOR., J.; PEREIRA, G. T.; BAHIA, A. S. R. S. Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, n.3, p. 244-256, 2014.

CAMPOS, M. C. C.; ALHO, L. C.; SILVA, D. A. P.; SILVA, M. D. R.; CUNHA, J. M.; SILVA, D. M. P. Distribuição espacial do efluxo de CO<sub>2</sub> em área de terra preta arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 11, n.4, p. 788-798, 2016.

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SOUZA, R. V. C. C.; ALMEIDA, M. C. Caracterização e Classificação de Terras Pretas Arqueológicas na região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n.3, p. 18-27, 2011.

CAMPOS, M. C. C.; SANTOS, L. A. C.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. M. P.; MARQUES JUNIOR, J.; FRANCA, A. B. C. Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n.4, p. 825-836, 2013.

CERNANSKY, R. A charcoal-rich product called biochar could boost agricultural yields and control pollution. Scientists are putting the trendy substance to the test. **Nature**, Reino Unido, v. 517, n.7534, p. 258-260, 2015.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses**. Wiley: New York. 2003. P.664.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M.; RHOTON, F. E.; TRAINA, S. J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays and Clay Minerals**, New York, v.47, n. 4, p.466-473, 1999.

DEARING, J. A.; LEES, J. A.; WHITE, C. Mineral magnetic properties of acid gleyed soils under oak and Corsican pine. **Geoderma**, Amsterdam, v. 68, n.4, p. 309–319. 1995.

DEARING, J. A.; LIVINGSTONE, I. P.; BATEMAN, M. D.; WHITE, K. Palaeoclimate records from OIS 8.0–5.4 recorded in loess-palaeosol sequences on the Matmata Plateau, southern Tunisia, based on mineral magnetism and new luminescence dating. **Quaternary International**, Amsterdam, v. 76–77, n.1, p. 43–56. 2001.

DEARING, J. **Environmental magnetic susceptibility: Using the Bartington MS2 System**. 2.ed. Kenilworth: Chi Publishing, 1999. p.54.

DEARING, J. A.; HAY, K. L.; BABAN, S. M. K.; HUDDLESTON, A. S.; WELLINGTON, E. M. H.; LOVELAND, P. J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, Oxford, v.127, n. 3, p.728–734, 1996.

DUNSHENG, X.; MING, J.; XIUMING, L.; FAHU, C.; JIANYING, M.; HUI, Z.; XUNMING, W.; HAITAO, W. A preliminary study on the magnetic signatures of modern soil in Central Asia. **Frontiers Earth Science**, China, v.1, n.3, p.275–283, 2007.

FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials, **Geoderma**, Amsterdam, v. 96, n. 3, p. 81–99, 2000.

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**, London, v.362, n.1478, p.187–196, 2007.

GLASER, B.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W.; RUIVO, M. L. Soil organic matter stability in Amazonian Dark Earths. In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, E. I. **Amazonian Dark Earths: Origin, properties, management**, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. cap. 8, p. 141-158.

GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.64, n.6, p.2174-2180, 2000.

HOUYUAN, L.; DONGSHENG, L. The effect of C3 and C4 plants for the magnetic susceptibility signal in soils. **Science in China Series D**, Beijing, v. 44, n. 4, p. 318-325, 2001.

JONG, E.; PENNOCK, D. J.; NESTOR, P. A. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. **Catena**, Amsterdam, v. 40, n.3, p. 291–305, 2000.

KAMPF, N.; KERN, D. C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. In: TORRADO-VIDAL, P.; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M.; SILVA, A.P. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. v.4. p.277-320.

KERN, D. C.; COSTA, M. L. Os solos antrópicos. In: LISBOA, P. L. P. **Caxiuanã**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeld, 1997. cap.3, p. 105-119.

KERN, D. C.; D'AQUINO, G.; RODRIGUES, T. E.; FRAZÃO, F. J. L.; SOMBROEK, W.; NEVES, E. G.; MYERS, T. P. Distribution of antropogenic dark earths. In: LEHMANN, J.; KERN, D.C.; WOODS, W.; GLASER, B. **Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management**. 1 ed. Norwell: Kluweracademic Publishers, p.51-76. 2003.

KERN, D.C.; KÄMPF, N. Antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná, Pará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, n.3, p.219-225, 1989.

LEAL, F. T.; FRANÇA, A. B. C.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SCALA JÚNIOR, N. Characterization of potential CO<sub>2</sub> emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, n.6, p. 535-539, 2015.

LEHMANN, J.; KERN, D.C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management**. Kluwer Academic Publishers: Dodrecht, 2003. p.523.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: An introduction. In: \_\_\_\_\_. (Ed.). **Biochar for environmental management: Science and Technology**. Londres: Earthscan, 2009. cap. 1.p.1-12.

LIMA, H. N. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**. Viçosa, 2001. 176 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E.R.; MELLO, J. W. V. GILKES, R. J.; KER, J. Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian Black Earth”) of Western Amazonia. **Geoderma**, Amsterdam, v.110, n.1, p.1–17, 2002.

LÓPEZ, L. R. **Pedologia quantitativa: espectrometria VIS-NIR-SWIR e mapeamento digital de solos**. 2009. 171 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

LU, S. G.; XUE, Q. F.; ZHU, L.; YU, J. Y. Mineral magnetic properties of weathering sequence of soils derived from in Eastern China. **Catena**, Amsterdam, v.73, n.1, p.23-33, 2008.

MAHER, B. A.; THOMPSON, R. Mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols. **Geology**, v.19, n.1, p.3–6, 1991.

MARQUES JUNIOR, J.; SANTOS, H. L. ; MATIAS, S. S. R. ; SIQUEIRA, D. S. ; MARTINS FILHO, M. V. Erosion factors and magnetic susceptibility in different compartments of a slope in Gilbués-PI, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n.1, p. 64-74, 2013.

MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. B.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, Amsterdam, v. 219-220, n.1, p. 63-71, 2014.

McBRATNEY, A.B.; MINASNY, B.; CATTLE, S. R.; VERVOORT, R. W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam, v.109, n.1-2, p.41-73, 2002.

MCCANN, J. M.; WOODS, W. I.; MEYER, D. W. Organic matter and anthrosols in Amazonia: interpreting the Amerindian legacy. In: REES, R.M., BALL, B.C., CAMPBELL, C.D., WATSON, C.A. **Sustainable management of soil organic matter**. Wallingford: CAB International, 2001. p. 180-189.

MEGGERS, B.J. **Amazonia: man and culture in a counterfeit paradise**. Washington: Smithsonian Institution Press, 1996. p. 214.

MICHEL, F.M.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; MORALES, M.P.; SERNA, C.J.; BOILY, J.F.; LIU, Q.S.; AMBROSINI, A.; CISMASU, A.C.; BROWN, G.E. Ordered ferrimagnetic form of ferrihydrite reveals links among structure, composition, and magnetism. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**. USA, v.107, n.7, 2787–2792, 2010.

MULLINS, C. E. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science—a review. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 28, n.2, p.223–246, 1977.

NEVES, E. G.; PETERSEN, J. B.; BARTONE, R. N.; SILVA, C. A. The historical and social origins of Amazonian Terras Pretas. In: LEHMANN, J.; GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian Dark Earths: Origin, properties and management**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003. p. 1-45.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; AQUINO, R. E.; TEIXEIRA, D. B.; SILVA, D. M. P. Use of scaled semivariograms in sample planning of soil chemical attributes in southern Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n.1, p. 31-39, 2015b.

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; SIQUEIRA, D. S.; CUNHA, J. M. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos do solo em Argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n.3, p. 668-681, 2015a.

PELUCO, R. G.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. B.; ADAME, C. R.; CORTEZ, L. A. Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.6, p.661-672, 2013.

PETERSEN, J. B.; NEVES, E.; HECKENBERGER, M. J. Gift from the past: Terra Preta and prehistoric Amerindian occupation in Amazonia. In: MCEWAN, C.; BARRETO, C.; NEVES, E. G. **Unknown Amazon: culture in nature ancient Brazil**. London: The British Museum Press, 2001. p. 86-105.

PICCOLO, A.; PIETRAMELLARA, G.; MBAGWU, J.S.C. Effects of coal-derived humic substances on water retention and structural stability of Mediterranean soils. **Soil Use and Management**, Malden, v. 12, n.4, p. 209-213, 1996.

PIETIKAINEN, J.; KIIKKILA, O.; FRITZE, H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. **Oikos**, Kobenhavn, v.89, n.2, p. 231-242, 2000.

RESENDE, M.; SANTANA, D. P.; FRANZMEIER, D. P.; COEY, J. M. D. Magnetic properties of Brazilian Oxisols. In: **International Soil Classification Workshop**, Rio de Janeiro, 1988. Proceedings. Rio de Janeiro, 1988. p.78-108.

SCHACHTSCHABEL, P.; BLUME, H. P.; BRÜMMER, G.; HARTGE, K. H. SCHWERTMANN, U. **Lehrbuch der Bodenkunde (Scheffer/Schachtschabel)**. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1998. p. 494.

SCHULZE, D.G. An introduction to soil mineralogy. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. **Minerals in soil environments**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. cap. 1. p.1-34.

- SCHWERTMANN, U.; CORNELL, R.M. **Iron oxides in laboratory**. New York: Cambridge, 1991. p.137.
- SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v.155, n.1, p.55–66, 2010.
- SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; TEIXEIRA, D. B.; VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S. Detailed mapping unit design based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena**, Amsterdam v. 135, p. 149-162, 2015.
- SOHI, S.; LOEZ-CAPEL, E.; KRULL, E.; BOL, R. **Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs**. CSIRO Land and Water Science. Report, 2009. 64 p.
- SOMBROEK, W. Amazon landforms and soils in relation to biological diversity. **Acta Amazonica**, Manaus, v.30, n.1, p.81-100, 2000.
- SOUZA JÚNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; VILAR, C. C.; HOEPERS, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 3, p. 513-519, 2010.
- SPOKAS, K.; MARQUES JUNIOR, J.; LA SCALA, N.; NATER, E.; SIQUEIRA, D.S. **Black Earths (Terra Preta): Observations of wider occurrence from residual fire**. In: LAL, R. (Eds.). *Encyclopedia of Soil Science*, 2. ed. North Andover: Aries Systems Corporation, 2015, cap.1. p. 1-4
- SPOSITO, G. **The surface chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, 1989. p. 234.
- STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Microbial response to charcoal amendments of highly weathered soils and Amazonian Dark Earths in Central Amazonia - Preliminary results. In: GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian Dark Earths: explorations in space and time**. Heidelberg: Springer Verlag, 2004. p. 195-212.
- TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C.; MACEDO, R.S.; NEVES-JUNIOR, E. F.; MOREIRA, A.; BENITES, V. M.; STEINER, C. As propriedades físicas e hídricas dos horizontes antrópicos das Terras Pretas de Índio na Amazônia Central. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D.C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. cap.18, 242-250 p.
- TORRENT, J.; LIU, Q. S.; BARRÓN, V. Magnetic susceptibility changes in relation to pedogenesis in a Xeralf chronosequence in northwestern Spain. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.61, n.2, p.161–173. 2010.
- VEROSUB, K. L.; ROBERTS, A. P. Environmental magnetism: past, present and future. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.100, n. b2, p.2175–2192, 1995.

## **CAPÍTULO 2 – Uso da suscetibilidade magnética na identificação de ambientes pedogenéticos em Terras Pretas Arqueológicas na região Sul do Amazonas**

**Resumo** - Na região Amazônica brasileira é comum a existência de sítios arqueológicos nos quais se observa modificações significativas nos aspectos físicos, morfológicos e químicos dos solos, promovidas pela ação humana. Estes solos caracterizam-se por possuir alta fertilidade natural, sendo conhecidos como Terra Preta Arqueológica (TPA). Embora muitos estudos tenham sido conduzidos visando compreender a magnitude dessas modificações e seus reflexos na gênese dos solos, muitas questões precisam ser esclarecidas, sobretudo as relacionadas com a mineralogia desses solos. Nesse sentido, objetivou-se utilizar a suscetibilidade magnética (SM) para identificar diferentes ambientes pedogenéticos em TPA na região sul do Amazonas. Foram analisados treze perfis de TPA e um perfil de floresta (não antropogênico), sendo coletadas amostras por horizonte em cada perfil. Posteriormente, realizaram-se análises texturais, determinação dos teores de matéria orgânica e análises mineralógicas. A SM foi avaliada nos solos (terra fina seca ao ar), nas cinzas das plantas e nos fragmentos de cerâmica encontrados nas áreas de TPA. A SM foi maior nos horizontes antrópicos, nos perfis com TPA, diminuindo em profundidade devido a ação antrópica com uso do fogo nestes solos. Os fragmentos de cerâmicas têm maior suscetibilidade magnética em comparação aos solos com terra preta arqueológica (terra fina seca ao ar), podendo ser uma das justificativas dos maiores valores de suscetibilidade magnética em relação ao solo não antropogênico. As cinzas das plantas apresentaram baixos valores de suscetibilidade magnética, indicando a influência litogenética nos valores de SM das TPAs pode ocorrer em razão do processo cumulativo de queima das plantas ao longo dos anos, no entanto, estes dados devem ser melhores estudados, com ajustes na metodologia de avaliação da suscetibilidade magnética e determinação dos minerais formados a partir da queima das plantas.

**Palavras-chave:** Amazônia, minerais ferrimagnéticos, mineralogia.

## 2.1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de solos alterados por populações pré-colombianas na paisagem amazônica, conhecidos regionalmente como Terra Preta de Índio (TPI) ou Terra Preta Arqueológica (TPA), representa importante registro da ocupação humana e do uso do solo na Amazônia (LIMA et al., 2002). As TPAs são solos com presença de horizonte A antrópico (Ap) que, de modo geral, apresentam teores elevados de nutrientes, principalmente cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e fósforo (P disponível), em comparação com a maioria dos solos de terra firme na Amazônia. Considera-se amostras representativas de TPA aquelas que possuem artefatos culturais e altos teores de P disponível e  $\text{Ca}^{2+}$ , diferenciando-se assim dos solos não antropogênicos. Estes solos não antropogênicos apresentam ausência de artefatos e baixa fertilidade natural, atribuída à natureza do material geológico, às geoformas e às condições bioclimáticas atuais (LIMA et al., 2006).

As TPAs apresentam na sua constituição mineralógica, entre outros minerais, os óxidos de Fe, que funcionam como marcadores pedoambientais, pois possuem diferentes comportamentos magnéticos, cuja magnitude depende de características específicas do solo (KÄMPF; CURI, 2000), como umidade, temperatura, teor de matéria orgânica, teor de Fe total e grau de intemperismo do solo. Ressalta-se também, as características intrínsecas do mineral, pois afetam o comportamento magnético dos óxidos de Fe, como por exemplo, substituição isomórfica e tamanho das partículas (BATISTA et al., 2008).

Diante deste contexto, a suscetibilidade magnética (SM) reflete a composição mineralógica do solo, ganha importância como uma técnica vantajosa para a detecção de minerais no solo, uma vez que o magnetismo entre os minerais são altamente diferentes. O magnetismo da magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetização espontânea), e da maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), de caráter ferrimagnético (SILVA; SOUZA JUNIOR; COSTA, 2010), são superiores ao magnetismo dos minerais de óxidos de ferro de goethita (Gt), e hematita (Hm), de caráter antiferrimagnético (DEARING, 1999).

A medida da SM pode ser realizada em alta (SMaf) e/ou em baixa (SMbf) frequência. De acordo com Dearing (1994), o uso da SMaf reflete a expressão magnética dos minerais litogênicos como magnetita, enquanto em baixa

corresponde aos minerais pedogênicos, como a maghemita. Por outro lado, a aplicação das duas medições indica a origem dos minerais pedogênicos; quando a variação da SM é alta, é um indício que neste solo houve a formação da maghemita, como produto da oxidação da magnetita durante a pedogênese (RESENDE et al. 1988), ou por ação antrópica, pelo uso do fogo (BARRÓN; TORRENT, 2013).

A porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente ( $\chi_{fd}$ ), resultante das medidas em alta e baixa frequência da SM, são proporcionais à concentração de minerais ferrimagnéticos na amostra e têm sido utilizados em diversos estudos (MULLINS, 1977; DEARING, 1994). A  $\chi_{fd}$  pode detectar a presença de minerais em níveis bem abaixo daqueles encontrados na difração de raios-X (DRX) e na espectroscopia Mössbauer (MAHER, 1986). Nesse sentido, Resende et al. (1988) sugeriram a utilização da SM como critério de classificação de solos em virtude de sua simplicidade de determinação. Desta forma, o emprego da SM torna-se uma importante técnica na ciência do solo em estudos sobre os óxidos de ferro, haja vista que estes são considerados pedoindicadores ambientais, pois refletem nas condições as quais foram formados.

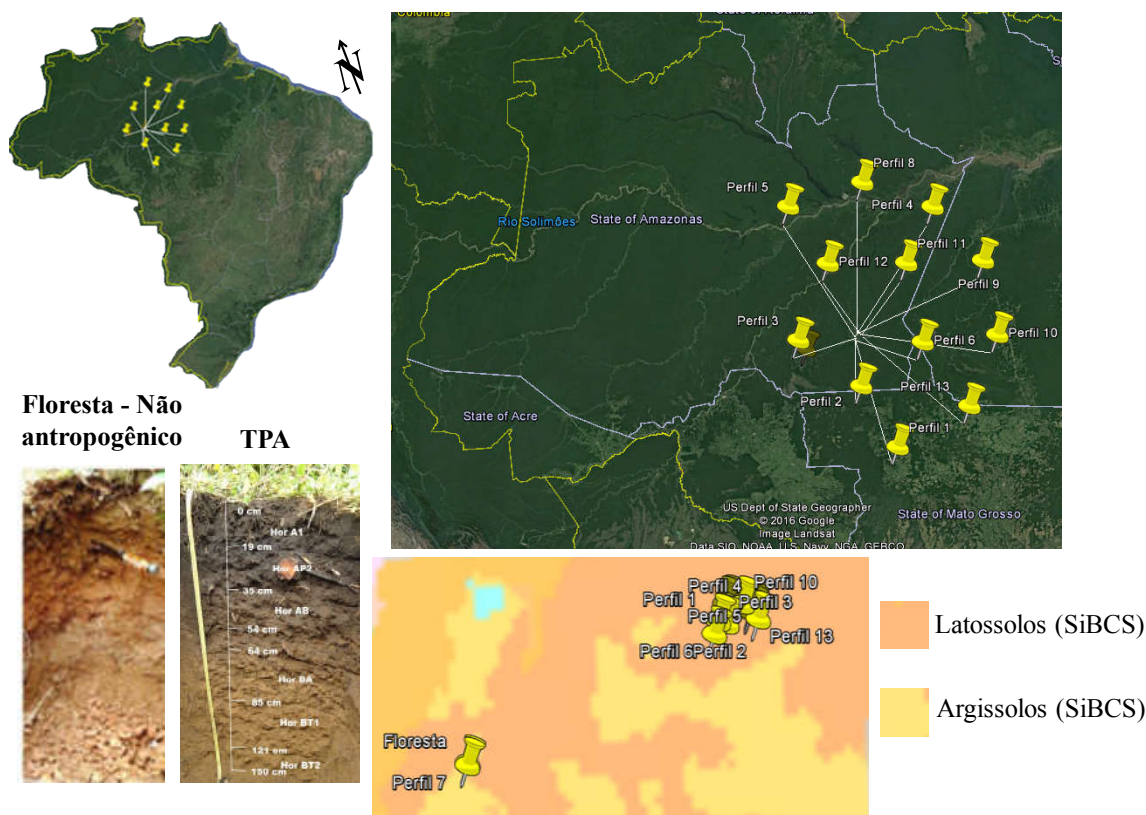
A SM tem sido usada como indicadora da influência de diferentes fontes de variação da mineralogia dos solos temperados e tropicais: influência geológica (FONTES et al., 2000; DUNSHENG et al., 2007), influência litogenética (BARRÓN; TORRENT, 2013) influência antropogenética por meio do fogo (MULLINS, 1977; SCHWERTMANN; CORNELL, 1991; SPOKAS et al., 2015) e, a contribuição do biomagnetismo pelas cinzas das plantas (HOUYUAN; DONGSHENG, 2001). De acordo com Houyuan e Dongsheng (2001), novas evidências de que cinzas de plantas C3 e C4 podem contribuir de maneiras diferentes para entender a origem dos componentes ultrafinos responsáveis pela alta  $S_{mbf}$  dos grãos superparamagnéticos. Estas fontes podem contribuir para os valores de SM encontrados nas TPAs, além dos fragmentos de cerâmicas que influenciam diretamente nos teores das frações texturais das TPAs (CAMPOS et al., 2011).

Neste sentido, a hipótese do presente trabalho é que a ação antrópica realizadas na formação das TPAs interferiram na SM destes solos. O objetivo deste trabalho é utilizar a SM para identificar se as ações antrópicas influenciaram na formação de diferentes ambientes pedogenéticos de áreas com TPAs.

## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

### Localização da área e amostragem

As áreas de solos de estudos com Terra Preta Arqueológica (TPA) e floresta localizam-se na região Sul do Amazonas distribuídas em duas localidades, sendo elas: município de Apuí (coordenadas geográficas 7° 11' S e 59° 53' W) e município de Manicoré (coordenadas geográficas 07° 59' S e 61° 39' W), (imediações da comunidade Santo Antônio do Matupí), localizada às margens da BR 230 - Transamazônica – sentido Humaitá/Apuí- AM (Figura 1). O clima na região é quente e úmido com estação seca pouco pronunciada, do tipo “Am” pela classificação de Köppen. A temperatura média anual varia entre 25 °C e 27 °C, sendo que a umidade relativa do ar fica estabelecida entre 85 e 90%, com precipitações pluviais acima de 2.500 mm por ano (CPRM, 2001).



**Figura 1.** Mapa com localização dos perfis de solos no município de Apuí e Santo Antônio do Matupí, no Estado do Amazonas.

Os locais representativos das TPAs conforme Figura 1 e Tabela 1 se encontram com uma média de 10 anos de exploração e uso pelos produtores de

maneira não intensiva. Nesses locais foram abertos treze perfis com TPA e um perfil em área de floresta com solo adjacente, e coletado amostras de solo por horizonte conforme Santos et al. (2015). Este trabalho dará continuidade as propostas de Santos et al. (2013), Aquino (2014) e projetos multidisciplinares financiados pelo convênio FAPESP/FAPEAM (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado Amazonas – FAPEAM e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP) (Processo: 09/53368-0).

**Tabela 1.** Localização dos perfis estudados na região Sul do Amazonas.

Perfis	LOCALIZAÇÃO	MANEJO ATUAL	COORDENADAS
TPA 1	BR 230, Km 05 sentido Apuí- Humaitá, AM.	Pastagem	07°12'36,8"S 59°55'16,3"W
TPA 2	Ramal da Coruja, Km 03, área da Fazenda Lisboa, Apuí, AM.	Pastagem	07°13'08,5"S 59°53'09,1"W
TPA 3	Vicinal Coruja, Km 04, lado esquerdo da Vicinal Apuí, AM.	Hortaliças	07°13'37,5"S 59°52'06,1"W
TPA 4	Lado esquerdo da BR 230, sentido Humaitá- Apuí, AM.	Hortaliças	07°11'55,9"S 59°54'40,9"W
TPA 5	Vicinal Campo Grande- BR 230 lado esquerdo sentido Humaitá- Apuí, AM, 4,5 Km da BR.	Milho	07°11'38"S 59°54'44,8"W
TPA 6	Ligação da vicinal Cangalhão com a vicinal Brasília, lado direito da BR 230, sentido Humaitá- Apuí, AM.	Pastagem	07°16'49,4"S 59°56'56,4"W
TPA 7	5 km da sede de Santo Antônio do Matupi a margem direita da BR 230.	Milho	07°56'33,06"S 61°30'45,2"W
TPA 8	Vicinal Mariano Km 4, Apuí, AM.	Milho	07°6'32,8"S 59°51'6,9"W
TPA 9	Vicinal Sulino Km 11, Apuí, AM.	Pomar	07°6'54,9"S 59°52'22,1"W
TPA 10	BR 230 Km 17	Pastagem	07°7'9,1"S 59°46'1,1"W
TPA 11	Vicinal Fábio Lucena Km 26, Apuí, AM.	Café	07°9'5,7"S 59°42'52,1"W
TPA 12	Vicinal Fábio Lucena Km 28 Apuí, AM.	Pastagem	07°10'4,4"S 59°42'55,4"W
TPA 13	Vicinal Paredão Km 34 Apuí, AM.	Capoeira	07°12'28,4"S 59°40'22,3"W
Floresta	5 km da sede de Santo Antônio do Matupi a margem direita da BR 230	Floresta	07°55'47"S 61°31'36"W

Os pontos de GPS foram locados em janeiro de 2011, (DATUM: South american '69). Onde W = weste (oeste); S = South (sul); AM = Amazonas.

O relevo é marcado pela presença de platôs, nas partes mais elevadas, combinados com áreas rebaixadas de sopé. Os platôs exibem superfícies topográficas planas, sendo a zona de borda marcada por colinas e cristas alinhadas, enquanto as áreas de planícies têm características de superfície pediplanada, localmente interrompida por colinas de topo plano (CPRM, 2001). Com relação à

geologia, Santo Antônio do Matupi está localizada sobre saprolitos de Granitos Rondonianos, que se caracterizam por apresentar muscovita, biotita, adamelitos e granodioritos, de origem intrusiva cratogênica, em forma de “stocks” e batólitos (BRASIL, 1978). Os solos que predominam na região são classificados como Latossolos Amarelos e Latossolos Vermelho-Amarelos e Argissolos (CAMPOS et al., 2012), entre outros. A vegetação característica dessa região é a Floresta Tropical Densa, constituída por árvores adensadas e multiestratificadas de 20 a 50 metros de altura, com clima úmido, elevadas temperaturas e alta precipitação (ZEE, 2008).

Na região de Apuí, o domínio geológico é formado por rochas mais antigas (Proterozóicas e Paleozóicas), inseridas na área cratônica do Escudo Brasil Central, com rochas predominantemente cristalinas (granitos e gnaisses, coberturas vulcânicas e rochas metassedimentares). Em relação aos solos presentes na parte sul do município ocorre predominância das seguintes classes de solos: Argissolos, Neossolos Litólicos, associados ou não a afloramentos rochosos e, nos topos planos e no relevo suave ondulado, os Latossolos Vermelho-Amarelos (SANTOS et al., 2013). A parte norte do município é composta pelas classes de solos: Argissolos e Nitossolos, nas áreas de relevo ondulado e forte ondulado, e Latossolos, nas áreas de relevo suave ondulado (SDS, 2004).

### **Análises físicas, químicas e mineralógicas**

A caracterização física, química e mineralógica encontra-se na Tabela 2. A granulometria foi realizada utilizando uma solução de NaOH a  $0,1\text{mol L}^{-1}$  como dispersante químico e agitação mecânica de alta rotação por 15 min. A fração argila foi separada por sedimentação pelo método da pipeta, a areia por tamisação e o silte foi calculado por diferença. O carbono total foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yoemans e Bremner (1988), a matéria orgânica (MO), por sua vez, foi estimada com base no carbono orgânico.

A fração terra fina seca ao ar (TFSA) foi submetida a dissolução seletiva por ataque com ácido sulfúrico (EMBRAPA, 1997). O extrato resultante foi usado para determinar o conteúdo de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Os teores de ferro relativo à totalidade dos óxidos de ferro pedogenéticos extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (FeDBC) seguiu a metodologia de Mehra e Jackson (1960), e a determinação dos teores de ferro extraídos por oxalato de amônio (FeOAA) relativos aos óxidos de

ferro pedogenéticos de baixa cristalinidade seguiu a metodologia citada por Camargo et al. (1986). Foi determinado a razão Feo/Fed (ou FeOAA/FeDBC) que indica a proporção dos óxidos de ferro pedogênicos que possuem baixa cristalinidade, sendo que o aumento desta relação corresponde à diminuição da proporção dos óxidos de ferro cristalinos (SCHWERTMANN; KÄMPF, 1985).

**Tabela 2.** Teores dos atributos dos solos com terra preta arqueológica e floresta.

Hor.	Prof. cm	Argila	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeDBC	FeOAA	Feo/Fed	MO g kg <sup>-1</sup>
TPA 1 – NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico, textura arenosa, A antrópico									
Ap <sub>1</sub>	0-19	91,40*	24,0	27,30*	75,0	6,40*	3,80*	0,59*	87,29*
Ap <sub>2</sub>	19-35	81,80*	37,0	17,90*	70,0	3,50*	2,70*	0,78*	91,14*
TPA 2 – NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico, textura média, A antrópico									
Ap <sub>1</sub>	0-24	151,32*	130,0	30,00*	175,0	15,00*	10,70*	0,71*	170,46*
Ap <sub>2</sub>	24-50	166,56*	131,0	32,90*	195,0	12,80*	9,60*	0,75*	95,13*
TPA 3 – ARGISSOLO AMARELO Eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico									
Ap <sub>1</sub>	0-22	259,56*	226,0	45,30*	280,0	28,40*	9,50*	0,33*	125,95*
Bt <sub>1</sub>	87-116	576,30*	321,0	56,00*	410,0	37,90*	4,50*	0,12*	37,80*
TPA 4 – CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico léptico, textura siltosa, A antrópico									
Ap <sub>1</sub>	0-22	242,52*	123,0	47,00*	165,0	22,00*	12,10*	0,55*	170,46*
AC	44-62	278,80*	153,0	49,70*	165,0	33,40*	19,00*	0,57*	52,31*
TPA 5 – ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico, textura argilosa, A antrópico									
BA	58-86	335,52	72,0	35,80*	155,0	20,80*	19,50*	0,94*	77,66*
Bt <sub>2</sub>	110-125	472,642	88,0	35,90*	185,0	21,80*	18,70*	0,86*	34,70*
TPA 6 – ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico, textura argilosa, A antrópico									
Ap <sub>1</sub>	0-12	313,42*	189,0	47,30*	305,0	34,20*	10,20*	0,30*	166,05*
Bt <sub>1</sub>	44-65	597,04*	255,0	65,40*	410,0	45,30*	6,10*	0,13*	39,24*
TPA 7 – ARGISSOLO AMARELO Eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico									
Ap <sub>1</sub>	0-19	196,00*	102,0	58,30*	250,0	22,40*	5,20*	0,23*	112,74*
Bt <sub>1</sub>	82-121	470,02*	125,0	74,90*	350,0	28,60*	0,80*	0,03*	37,87*
TPA 8 - LATOSSOLO AMARELO Distrófico antrópico, textura argila, A antrópico									
Ap <sub>1</sub>	0-15	331,07**	140,50**	63,49**	215,00**	37,38**	6,69**	0,18**	65,00**
Bw <sub>2</sub>	91-117	649,57**	294,50**	77,40**	255,00**	42,08**	16,80**	0,40**	7,00**
TPA 9 - ARGISSOLO AMARELO Eutrófico típico, textura argila, A antrópico									
Ap <sub>1</sub>	0-19	383,38**	20,50**	90,70**	210,00**	51,47**	11,26**	0,22**	56,00**
Bt <sub>2</sub>	66-100	675,00**	289,50**	124,36**	250,00**	74,77**	11,67**	0,16**	8,00**
TPA 10 - ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico, textura siltosa, A antrópico									
Ap <sub>1</sub>	0-21	632,95**	17,00**	52,00**	170,00**	24,02**	19,33**	0,80**	57,00**
Bt <sub>1</sub>	58-91	261,79**	30,50**	45,55**	150,00**	24,38**	16,56**	0,68**	13,00**
TPA 11 - ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico, textura argila, A antrópico									
Ap <sub>1</sub>	0-19	363,92**	131,00**	54,22**	90,00**	32,87**	5,79**	0,18**	32,00**
Bt <sub>2</sub>	67-104	599,20**	108,00**	98,96**	85,00**	54,18**	9,87**	0,18**	7,00**
TPA 12 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO órticos típico, textura média arenosa, A antrópico									
Ap <sub>1</sub>	0-18	80,85**	13,50**	30,64**	35,00**	17,52**	2,28**	0,13**	31,00**
C <sub>2</sub>	70-90	114,49**	5,50**	115,69**	25,00**	56,71**	17,95**	0,32**	4,00**
TPA 13 - ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico, textura argila, A antrópico									
Ap <sub>1</sub>	0-19	283,44**	88,00**	57,85**	125,00**	59,95**	1,22**	0,02**	34,00**
Bt <sub>2</sub>	65-92	575,49**	56,50**	81,02**	200,00**	39,37**	4,08**	0,10**	7,00**
FLORESTA – LATOSSOLO AMARELO Amarelo distrófico típico, textura média, A moderado									
A <sub>1</sub>	0-20	327,94**	182,00**	39,40**	305,0**	30,10**	1,9**	0,06**	18,65**
Bw <sub>1</sub>	58-78	425,31**	324,00**	73,70**	385,0**	39,10**	0,5**	0,01**	9,00**

\* Dados publicados por Santos et al. (2013); \*\*Dados publicados por Aquino (2014). Hor.- horizontes; Prof.- profundidades; cm- centímetro; óxidos do ataque sulfúrico (SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), FeOAA - teores de ferro extraídos por oxalato de amônio (Feo); FeDBC - teores de ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed); relação (Feo/Fed); MO – matéria orgânica.

Para a análise de difratometria de raios-x (DRX), a argila foi separada da amostra de solo pelo método de centrifugação. Os minerais da fração argila hematita

(Hm\_012), goethita (Gt\_110) e maghemita (Mh\_220 e Mh\_400) foram caracterizadas por DRX em lâminas confeccionadas com material em pó. A caracterização da Hm e da Gt ocorreu após o tratamento da fração argila com NaOH 5 mol L<sup>-1</sup> (1 g argila 100 ml<sup>-1</sup> solução), para a concentração dos mesmos, segundo método de Norrish e Taylor (1961), modificado por Kämpf e Schwertmann (1982). A razão Gt/(Gt+Hm) foi obtida após o cálculo das áreas dos reflexos da Hm (012) e Gt (110), nos reflexos dos difratogramas, e nesse caso foi multiplicada a área do pico da Gt (110) pelo valor 0,35 devido à intensidade de 35% da Hm (012) (KÄMPF; SCHWERTMANN, 1998). O difratômetro utilizado foi o Mini-Flex II- Rigaku, empregando-se cátodo de cobre com filtro de níquel e radiação  $\alpha$  (20mA, 30Kv). A velocidade de varredura empregada foi de 1 °2 $\theta$  por minuto, com amplitude de 23 a 49 °2 $\theta$  para a caracterização da Hm e Gt.

Para a obtenção das estimativas do teor de Gt, o teor de ferro cristalino foi multiplicado pela razão Gt/(Gt+Hm) e por 1,59. Para a Hm, multiplicou-se o teor de ferro cristalino por 1,43 após ser subtraído deste valor a quantidade de ferro correspondente à Gt (DICK, 1986), conforme as equações 1 a 4:

$$[(Gt/Gt+Hm)] \times (Fed\%-Feo\%) = \%FeGt \quad (1)$$

$$FeGt \% \times 1,59 = FeOOH = \%Gt \quad (2)$$

$$FeGt \% - (Fed\%-Feo\%) = FeHm\% \quad (3)$$

$$FeHm 1,43 \% = Fe_2O_3 = Hm\% \quad (4)$$

em que,

Fed= teores de ferro extraído por ditonito-citrato-bicarbonato de sódio (FeDBC);

Feo = teores de ferro extraídos por oxalato de amônio (FeOAA).

### **Leitura da suscetibilidade magnética**

A determinação da suscetibilidade magnética (SM) foi realizada em laboratório, nas amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) das TPAs e floresta (solo adjacente) coletadas em cada horizonte dos perfis estudados, nas cinzas de amostras de plantas e fragmentos de cerâmica encontrados nas TPAs. Estas foram analisadas pelo medidor MS2, da Bartington Instruments Ltd., o qual é acoplado a um sensor de laboratório MS2B de baixa (0,47 Hz) e alta (4,7 Hz) frequência.

Com este sensor é possível determinar a SM utilizando um campo magnético baixo e alternado, de intensidade de -80 A m<sup>-1</sup> (10<sup>-4</sup> T) e de frequência

variada. Minerais estáveis com domínio simples (SD) e diâmetro próximo a 0,03  $\mu\text{m}$  contribuem para maiores leituras da SMbf, o que não ocorre na medição em alta frequência. A frequência mais elevada tem o efeito de deslocar o limite entre os minerais menores superparamagnéticos (SP) e multidomínios (MD). Assim, minerais perto da fronteira de SP comportam-se em termos magnéticos como minerais SD, com um valor menor suscetibilidade (DEARING, 1994).

Os valores da SM em baixa (SMbf) e alta frequência (SMaf) foram utilizados para calcular a porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente ( $\chi_{fd}$ ) (Equação 5) (DEARING, 1999). Os valores da  $\chi_{fd}$  foram classificados de acordo com Dearing (1994) (Tabela 3).

$$\chi_{fd} = 100 [(SMbf - SMaf)/SMbf] \quad (5)$$

em que:

$\chi_{fd}$  é a porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente; SMbf é a SM medida na baixa frequência; SMaf é a SM medida na alta frequência.

**Tabela 3.** Classificação dos valores da  $\chi_{fd}$ .

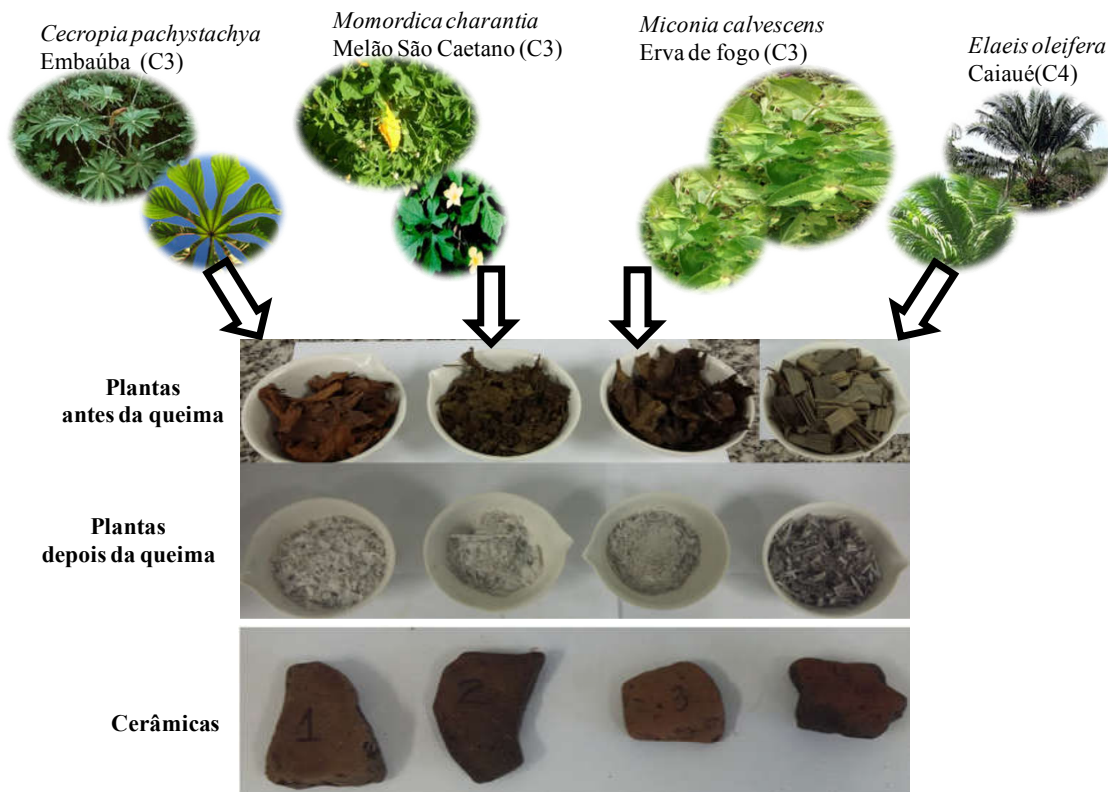
Classe de variação	$\chi_{fd}$	Características da amostra
Baixa	$\chi_{fd} \leq 2$	Praticamente não existe grãos SP (< 10%)
Media	$2 < \chi_{fd} \leq 10$	Mistura de grãos SP e grãos não SP ou grãos SP < 0,005 $\mu\text{m}$
Alta	$10 < \chi_{fd} \leq 14$	Praticamente todos os grãos são SP (> 75%)
Muito alta	$\chi_{fd} \geq 14$	Valores raros, medições erradas, anisotropia magnética, contaminação por metal ou efeito do fogo

Fonte: Dearing (1994); SP - superparamagnético (diâmetro  $\sim$  0,03  $\mu\text{m}$ )

Amostras de plantas foram coletadas em áreas de TPA para verificar a leitura da SM com o objetivo de verificar se há influência da magnetização das plantas no solo (Figura 2). Foram selecionadas 4 plantas as quais são as mais abundantes em áreas de TPA, sendo elas: *Cecropia pachystachya* – Embaúba (C3); *Miconia calvescens* - Erva de fogo (C3); *Momordica charantia* – Melão de São Caetano (C3) e *Elaeis oleifera* - Caiaué (C4). O termo C3 e C4 é utilizado para distinguir plantas que possuem diferentes vias metabólicas para a fixação do carbono. As plantas foram colocadas em mufla a 600 °C por 3 horas e a SM foi lida aumentando a sensibilidade do equipamento em 10 vezes (0,1).

Além das amostras de plantas, foram também medidos os valores de SM dos fragmentos de cerâmica presentes nos solos de 4 locais distintos, no qual foram

amostradas as plantas nas TPA. Os fragmentos de cerâmica foram lavados para retirar restos de solo que pudessem interferir nas leituras e posteriormente, estes foram moídos. Em geral a composição mineralógica dos fragmentos de cerâmica das TPA é constituída pelos produtos da queima dos temperos para formação das cerâmicas (cauxi e cariapé), minerais de argila (geralmente caulinita com maior abundância), feldspatos (albita e microcline), hematita, maghemita, goethita, anatásio, amorfos de fosfato de alumínio, entre outros (COSTA et al., 2004).



**Figura 2.** Ensaio para avaliação do comportamento magnético das cinzas de plantas de ciclo fotossintético C3 e C4 e fragmentos de cerâmica com ocorrência em áreas de TPA.

### Forma de análise dos dados

Foram apresentados somente os valores dos atributos no horizonte antrópico superior dos perfis com TPAs (horizonte A) e floresta, com intuito de observar a variação destes atributos entre o horizonte com TPA e horizonte sem a influência do horizonte antrópico (Tabela 2 e 4). O perfil 5 com TPA não foi possível apresentar o horizonte superficial, devido a contaminação das amostras sendo estas descartadas para este trabalho.

Os dados foram analisados por tabelas e gráficos para melhor compreensão dos atributos dos solos com TPAs e solo adjacente, a partir do uso da SM. Um gráfico foi elaborado considerando-se os valores de óxidos de ferro total, FeDBC, FeOAA, SMbf e  $\chi_{fd}$  com a média de todos os valores dos perfis com TPA e do solo adjacente, para observar a diferença destes atributos entre a TPA e o solo não antropogênico (Figura 3). Foi caracterizado os óxidos da fração argila Hm e Gt, inclusive da Mh por meio dos difratogramas (Figura 4), onde foi utilizado o TPA 11, pois apresentou a melhor visualização do pico da Mh. Outro gráfico foi elaborado com os valores de  $\chi_{fd}$  de todos os horizontes dos perfis na tentativa de observar a variação/comportamento dos valores de  $\chi_{fd}$  em profundidade (Figura 5). Um gráfico com os valores de SMbf e  $\chi_{fd}$  das plantas e dos fragmentos de cerâmica foi elaborado para observar se estes valores podem contribuir nos resultados da SM e consequentemente, na mineralogia destes solos com TPAs (Figura 6).

### 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de  $Fe_2O_3$  foram de forma geral, muito parecido para os perfis com TPAs e solo não antropogênico, sendo que em quase todos os perfis os valores foram menores que  $80 \text{ g kg}^{-1}$ , indicando baixos teores de óxidos de ferro (hipoférrico) (EMBRAPA, 1997), com exceção dos horizontes subsuperficiais dos perfis com a TPA 11, TPA 12, TPA 13 e os horizontes superficial e subsuperficial do TPA 9 (Tabela 2 e Figura 3).

Em relação aos teores de Gt e Hm em todos os perfis (Tabela 4), verifica-se o predomínio da Gt. O predomínio de Gt nestes solos pode ser justificado pelo acúmulo de MO nestes perfis, pois, segundo Schwertmann e Taylor (1989), a MO favorece a formação da Gt em relação à Hm, tendo um papel que consiste na complexação do ferro e inibindo a formação de ferrihidrita, que é a precursora obrigatória da Hm (CURI; FRANZMEIER, 1984).

O solo sob floresta (solo adjacente) apresenta de forma geral, maiores valores de Hm e Gt do que as TPAs (Tabela 4), sendo um indicativo de formação de maghemita (Mh) e ferrihidrita nas TPAs, devido à queima de resíduos orgânicos (fogo) na presença da Hm e Gt (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989; MICHEL et al., 2010), transformando-os em Mh. Nos estudos de Costa et al. (2004), Sergio et al.

(2006) e Silva et al. (2011), os autores encontraram Mh nos solos e nos fragmentos de cerâmicas encontrados em TPAs. Por outro lado, a presença de citratos e fosfatos em temperaturas ambientes podem levar a formação de ferrihidrita no solo (MICHEL et al., 2010).

**Tabela 4.** Teores de atributos dos solos com terra arqueológica arqueológica e floresta.

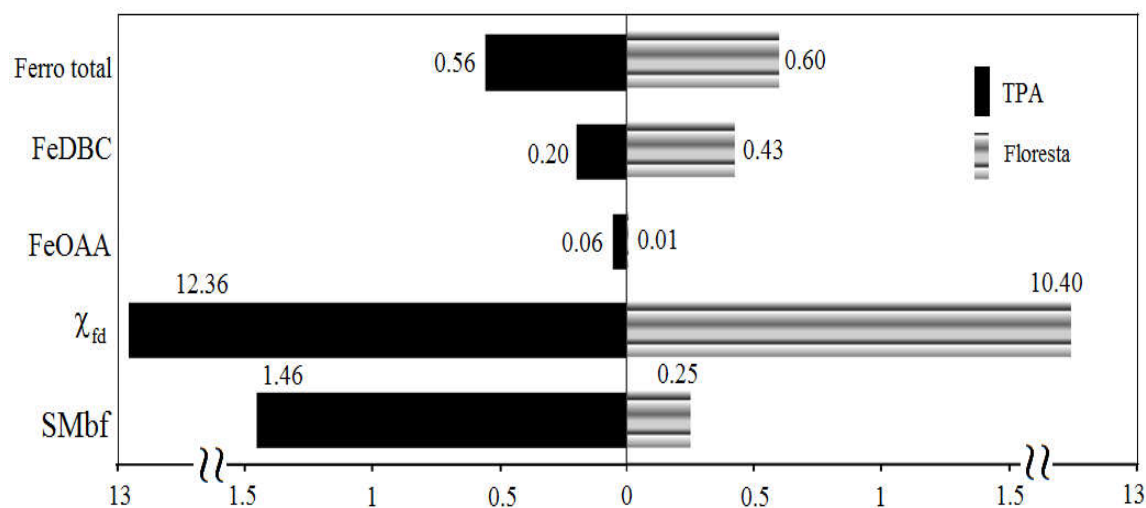
Horizontes	Profundidade cm	Goethita -----g kg <sup>-1</sup> -----	Hematita	Smbf 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	χ <sub>fd</sub> %
TPA 1 – NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico, textura arenosa, A antrópico					
Ap <sub>1</sub>	0-19	2,36	1,60	4,87	10,27
Ap <sub>2</sub>	19-35	0,73	0,49	3,36	9,23
TPA 2 – NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico, textura média, A antrópico					
Ap <sub>1</sub>	0-24	4,31	2,28	2,53	11,86
Ap <sub>2</sub>	24-50	3,36	1,56	1,97	12,18
TPA 3 – ARGISSOLO AMARELO Eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico					
Ap <sub>1</sub>	0-22	24,34	5,14	3,70	12,70
Bt <sub>1</sub>	87-116	45,14	7,16	0,58	13,79
TPA 4 – CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico léptico, textura siltosa, A antrópico					
Ap <sub>1</sub>	0-22	8,50	6,51	3,92	9,95
AC	44-62	15,11	7,00	2,46	9,76
TPA 5 – ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico, textura argilosa, A antrópico					
BA	58-86	1,20	0,78	0,17	17,65
Bt <sub>2</sub>	110-125	3,50	1,29	0,15	20,00
TPA 6 – ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico, textura argilosa, A antrópico					
Ap <sub>1</sub>	0-12	28,62	8,58	2,47	14,17
Bt <sub>1</sub>	44-65	38,02	21,86	0,61	11,48
TPA 7 – ARGISSOLO AMARELO Eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico					
Ap <sub>1</sub>	0-19	18,87	7,62	3,00	11,00
Bt <sub>1</sub>	82-121	34,92	8,35	0,47	14,89
TPA 8 - LATOSSOLO AMARELO Distrófico antrópico, textura argila, A antrópico					
Ap <sub>1</sub>	0-15	3,15	2,32	2,97	12,37
Bw <sub>2</sub>	91-117	3,13	1,52	0,24	8,70
TPA 9 - ARGISSOLO AMARELO Eutrófico típico, textura argila, A antrópico					
Ap <sub>1</sub>	0-19	7,48	3,02	6,49	10,56
Bt <sub>2</sub>	66-100	9,88	3,12	1,45	9,93
TPA 10 - ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico, textura siltosa, A antrópico					
Ap <sub>1</sub>	0-21	0,27	0,16	1,56	11,18
Bt <sub>1</sub>	58-91	1,77	0,94	0,37	4,76
TPA 11 - ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico, textura argila, A antrópico					
Ap <sub>1</sub>	0-19	3,14	1,52	0,44	12,73
Bt <sub>2</sub>	67-104	5,92	2,18	0,18	9,52
TPA 12 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO órticos típico, textura média arenosa, A antrópico					
Ap <sub>1</sub>	0-18	1,06	0,75	1,94	8,53
C <sub>2</sub>	70-90	3,53	0,47	0,18	0,00
TPA 13 - ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico, textura argila, A antrópico					
Ap <sub>1</sub>	0-19	5,98	3,02	1,30	10,46
Bt <sub>2</sub>	65-92	6,11	2,14	0,41	9,52
FLORESTA – LATOSSOLO AMARELO Amarelo distrófico típico, textura média, A moderado					
A <sub>1</sub>	0-20	34,97	8,87	0,10	10,00
Bw <sub>1</sub>	58-78	41,73	17,66	0,34	8,82

Smbf- valores da suscetibilidade magnética em baixa frequência; χ<sub>fd</sub>- porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente.

Foram observados maiores teores de minerais de alta cristalinidade (maior teor de FeDBC) (Figura 3) no solo adjacente em relação aos perfis com TPAs, sendo que o FeDBC foi maior que o FeOAA em todos os solos estudados. As condições

ambientais (alta umidade, elevadas precipitações pluviométricas e boa drenagem) foram favoráveis à formação dos minerais de maior cristalinidade.

Os valores de SMbf variaram de 0,10 (Floresta – A<sub>1</sub>) a 6,49  $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  (TPA 9 – Ap<sub>1</sub>) (Tabela 4). De forma geral, os maiores valores de SMbf foram encontrados nos perfis com TPA, principalmente no horizonte antrópico estudado, decrescendo em profundidade (Figura 3), em decorrência das ações antrópicas nestes horizontes (uso do fogo), favorecendo a formação de minerais magnéticos, conforme destacado por Costa et al. (2004) e Sergio et al. (2006). Apenas a TPA 5 apresentou valores de SM abaixo dos valores do solo adjacente, sendo um valor atípico para as TPAs, uma vez que em geral, as TPAs apresentam maior SM que os solos não antropogênicos (Tabela 4). Existe grande variação da SMbf nos diferentes perfis, e uma possível explicação é devido a alta variabilidade das frações texturais (decorrente da presença de fragmentos líticos, cerâmicas e uso de fogo) encontradas entre os perfis.



**Figura 3.** Análises dos atributos FeDBC (em %), FeOAA (em %), ferro total (em %), SMbf - suscetibilidade magnética em baixa frequência ( $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) e porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente ( $\chi_{fd}$ ) de todos os perfis com terra preta arqueológica e solo adjacente (floresta).

De forma geral, a SMbf foi superior na área com TPA em relação ao solo de floresta com solo adjacente (Figura 3). Além das ações antrópicas, este comportamento também pode ser explicado pela intensidade de intemperismo dos

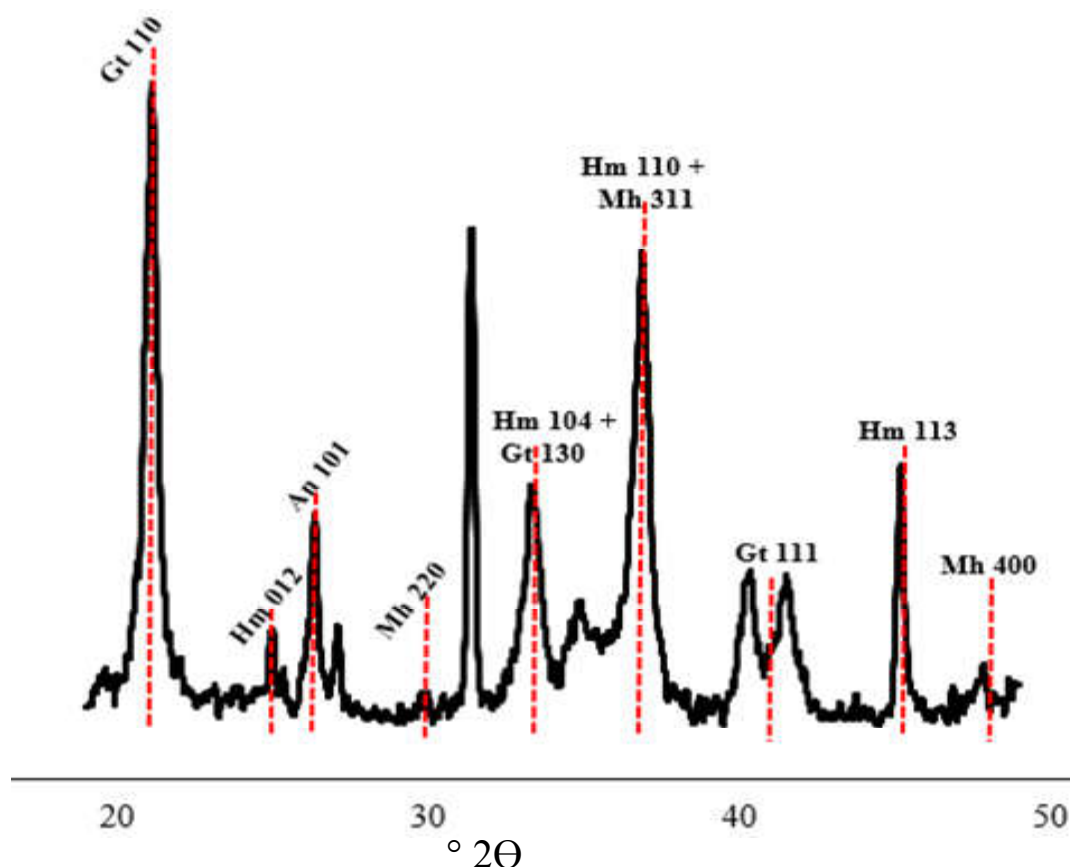
solos de TPA. Os teores de Fe nesses materiais (mesmo em baixas concentrações) devem ter levado à formação de minerais ferrimagnéticos, seja por meio da queima, oxidação da magnetita (tamanho pequeno), transformação da ferrihidrita para Mh ou via ciclo de oxirredução ocorrido em condições pedogênicas normais (MULLINS, 1977; TORRENT; BARRÓN; LIU, 2006; LU et al., 2008), uma vez que a região apresenta condições favoráveis a esses processos (LU, 2000).

Estas análises permitem inferir que nas TPAs, a formação de microambientes específicos contribui para a neoformação de minerais como a Mh. Isso permite explicar a maior SM das TPAs quando comparadas com os solos de floresta (solo adjacente), conforme encontrado por Oliveira et al. (2017), ao qual estes autores alertaram que a ação antrópica pode ocasionar aumento da SM nas TPAs.

A presença de Mh e ferrihidrita ferrimagnética mesmo em baixas concentrações em áreas de TPAs conforme encontrado por estudos de Costa et al. (2004), Sergio et al. (2006) e Silva et al. (2011), também pode explicar a maior SM nestes solos em relação ao solo adjacente (Figura 3 e 4). A presença de Mh na fração argila das TPAs tem sua gênese creditada à queima de resíduos orgânicos na presença de óxidos como Gt e Hm (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989). Isto pode ser uma justificativa para os maiores valores de SM<sub>bf</sub> nos horizontes antrópicos. Esta é uma das hipóteses de formação dos minerais magnéticos na TPA, que pode ser descrita como hipótese antropogênica ou antrópica. Em seu estudo, Spokas et al. (2015) observou o efeito do fogo residual na suscetibilidade magnética de solos de cerrado. Barrios et al. (2017) também encontraram variações da SM em áreas de cana-de-açúcar colhidas com e sem queima.

Na Figura 4, é possível observar por meio dos difatograma a caracterização dos óxidos da fração argila Hm e Gt, inclusive a expressão discreta da Mh na TPA (TPA 11). Apesar dos baixos teores de Fe, a presença de Mh nas TPAs confirma a hipótese de que a ação antrópica com uso do fogo ao longo do tempo influenciou na formação destes óxidos com maior expressão magnética e conseqüentemente, na valores da suscetibilidade magnética das TPAs. Por sua vez, a Mh 311 encontra-se sobreposta a Hm 110, desta forma, não é possível a sua visualização com clareza, porém, fica claro que as TPAs apresentam Mh em sua composição mineralógica. Não foram constatados Mh no solo não antropogênico sob floresta.

De forma geral, os maiores picos referentes a Gt indica que este é o principal mineral oxidico da fração argila nos solos de TPA, seguido da Hm e Mh conforme Tabela 4 e Figura 4. Tal evidência justifica a SM nos solos de TPA que se deve a Mh.



**Figura 4.** Caracterização dos óxidos de ferro da fração argila em terra preta arqueológica.

Outra possível explicação para os maiores valores de SMbf encontrados nas TPAs é a hipótese pedogênica, pela formação de Mh pedogênica a partir da formação de ferrihidrita. Durante o processo de intemperismo, os teores de Fe presentes nesses materiais devem ter levado à formação de minerais ferrimagnéticos, seja por meio da queima, oxidação da magnetita, transformação da ferrihidrita para Mh, desidratação da lepidocrocita ou via ciclo de oxirredução em condições pedogênicas normais (MULLINS, 1977; TORRENT; BARRON; LIU, 2006; LU et al., 2008). Por outro lado, a formação da ferrihidrita ferrimagnética (superparamagnética), pode ter sua formação influenciada pela presença de citratos

e fosfatos, que bloqueia a ferrihidrita antes da formação de Hm (MICHEL et al., 2010; BARRON; TORRENT, 2013). Tais processos são justificáveis uma vez que a região apresenta condições favoráveis a esses processos, com altas temperaturas e precipitações pluviais (LU, 2000). .

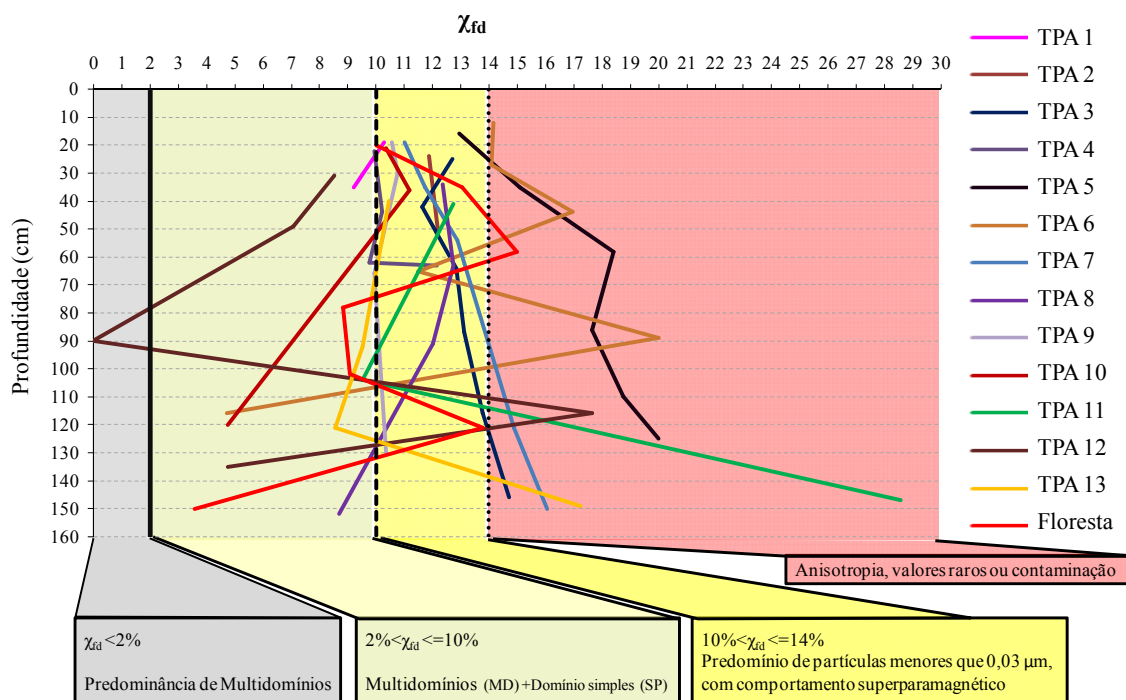
O menor valor de SM foi encontrado no perfil da área de floresta ( $0,10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ), aumentando em profundidade, devido ao acúmulo de argila no horizonte subsuperficial (Tabela 4). Em condições naturais de formação de solo, Fontes et al. (2000) mencionaram que o comportamento magnético é mais evidente em solos cuja fração argila é maior. Isso ocorre porque, na fração areia, a magnetita, é oxidada diretamente em Hm, enquanto na fração argila, a magnetita é oxidada em Mh (SINGER et al., 1995). No entanto, os baixos valores de SMbf encontrados na floresta é um indicativo de que não houve influência da ação antrópica com uso de fogo, não contribuindo para formação de minerais com elevados valores de SM, e com isso, os maiores valores de Hm e Gt, minerais com comportamento antiferromagnético, resultando solos com reduzida SMbf na floresta.

A  $\chi_{fd}$  indica a presença de partículas ferrimagnéticas: superparamagnéticas (SP) ou de multidomínios (MD) (Tabela 4, Figuras 3, 4 e 5). O valor de  $\chi_{fd}$  das partículas pequenas SP é grande, enquanto partículas grosseiras de MD apresentam valores pequenos ou zero (GRIMLEY; ARRUDA; BRAMSTEDT, 2004). A  $\chi_{fd}$  dos perfis de TPA e da floresta variaram de 0 (zero) a valores superiores a 14 % (Figura 5), com maior ocorrência de valores entre 10 e 14 %.

De acordo com Dearing (1994), valores de  $\chi_{fd}$  próximos 10 % indicam a predominância de partículas menores de  $0,03\mu\text{m}$ , com comportamento superparamagnético, como aqueles presentes na fração argila (Mh), em detrimento das partículas grosseiras de domínios simples e múltiplo (magnetita), comuns nas frações areia e silte dos solos (COSTA et al., 1999). Nestes locais os valores de  $\chi_{fd}$  podem estar relacionados às condições ambientais que favorecem a formação de novos minerais e, conseqüentemente a variação da SM, fenômeno conhecido como anisotropia magnética. A exemplo disso tem-se o efeito do fogo na neoformação de minerais (SPOKAS et al., 2015), como a Mh (BARRÓN; TORRENT, 2013).

Nota-se valores de  $\chi_{fd}$  acima de 14% nos perfis TPA 3, TPA 5, TPA 6, TPA 7, TPA 11, TPA 12 e TPA 13 e Floresta (Figura 5), principalmente em subsuperfície. Os

valores de  $\chi_{fd}$  acima de 14% não decorrem de erros, mas provavelmente do grande teor de partículas SP (SILVA; SOUZA JUNIOR; COSTA, 2010), além da presença de fogo (DEARING, 1994) e com isso, esses solos podem apresentar elevados valores de SMbf (Tabela 5). Neste caso, a maior variação em subsuperfície pode estar relacionada ao processo de lessivagem que podem ter ocorrido nestes solos, ocasionando uma mistura de minerais formados em condições normais (pedogenética e/ou litogenética), além da influência do fogo (hipótese antropogênica). Esses minerais formados em superfície podem ter sido acumulados em subsuperfície pelo processo de lessivagem, conforme relatado por Spokas et al. (2015), que estudou a influência antropogênica (uso do fogo) na formação de minerais antropogênicos e verificou que o acúmulo desses minerais em subsuperfície tem contribuição direta na variação da SM dos solos.



**Figura 5.** Relação entre a profundidade do solo (cm) e a porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente ( $\chi_{fd}$ ).

Valores de  $\chi_{fd}$  entre 2 e 10 % foram observados nas amostras da TPA 1, TPA 4, TPA 6, TPA 8, TPA 10, TPA 11, TPA 12, TPA 13 e Floresta (Figura 5). Nesta faixa há uma mistura de minerais de multidomínios e domínio simples (SD), ou provavelmente, uma predominância de minerais superparamagnético. Uma possível

explicação para estes resultados pode estar na presença de fragmentos cerâmicos, que tem na sua composição mineralógica a presença de Mh, conforme observações em estudo com TPAs (COSTA et al., 2004; SERGIO et al., 2006). Os valores de  $\chi_{fd}$  entre 10 e 14 % foram detectados em todos os perfis amostrados, pois, segundo Silva, Souza Junior e Costa (2010), essas ocorrências indicam a presença de partículas superparamagnéticas, evidenciada pelos valores de SMbf, independentemente do material de origem.

Apenas o perfil com a TPA 12 (Neossolo Quartzarênico) apresentou valores de  $\chi_{fd}$  menores que 2 % (Figura 5), indicando a presença predominante de minerais multidomínios. Esses minerais, isoladamente, são de ocorrência comum em solos formados sobre rochas magmáticas ácidas e metamórficas, pobres em Fe, e, portanto, em minerais ferrimagnéticos (MULLINS, 1977). Neste caso, o teor de  $Fe_2O_3$  considerado relativamente elevado e com baixo valor de  $\chi_{fd}$ , indica a presença predominante de outros minerais que não apresentam comportamento magnético (GRIMLEY; ARRUDA; BRAMSTEDT, 2004), presentes na fração areia destes solos.

A predominância de valores de  $\chi_{fd}$  maiores que 2 % (Figura 5), deve-se à presença generalizada de minerais superparamagnéticos nas amostras analisadas, o que é decorrente do alto grau de intemperismo dos solos de TPA e floresta, por meio de ciclos de oxidação/redução, favorecidos por altas temperaturas e precipitações (COSTA et al., 1999), além da formação da Mh pedogênica, formada pela queima de resíduos orgânicos na presença de Gt e Hm (MULLINS, 1977; SCHWERTMANN; CORNELL, 1991, BARRON; TORRENT, 2013).

As leituras magnéticas que determinam a SM, que é uma das propriedades do solo com grande potencial de aplicação na região amazônica, no entanto, é preciso esclarecer algumas questões que ainda não estão bem compreendidas sobre as diferentes causas de variação da SM, dentre elas a relação dos resíduos de fogueiras domésticas nas TPAs provenientes do uso da população local (SPOKAS et al. 2015).

Pelo exposto, as variações de SMbf e  $\chi_{fd}$  encontradas, provavelmente podem estar relacionadas a cinco origens: (i) litogenética, (ii) pedogenética, influenciada pelo processo redox na paisagem, (iii) antropogênica, transformação termal dos minerais presentes no solo em presença de fogo, (iv) incremento de

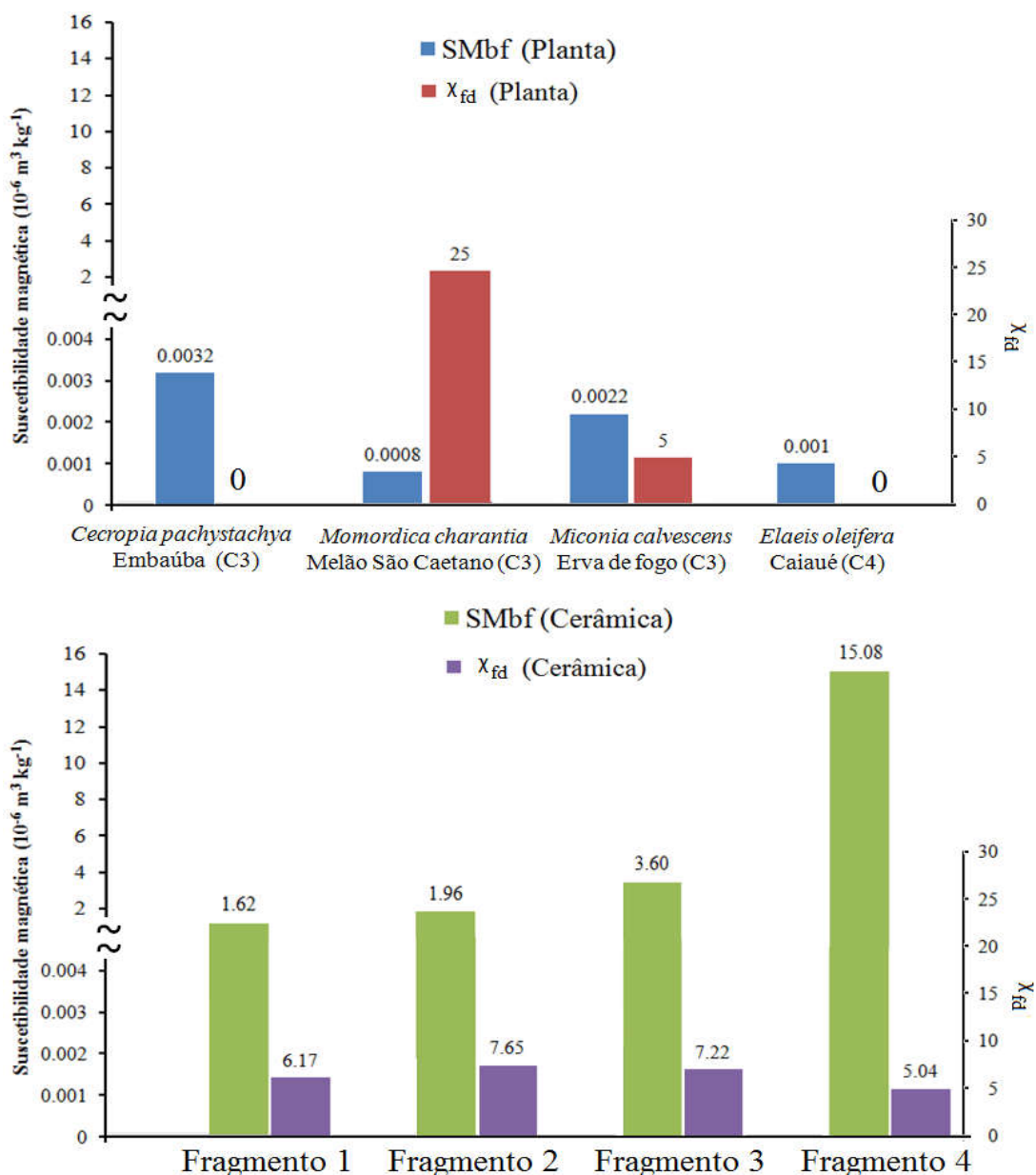
grãos superparamagnéticos advindos das cinzas de plantas C3 e C4 (hipótese fitogenética), e (v) presença de fragmentos líticos e cerâmicos que influenciam nos teores das frações areia e argila. Estas são as causas que podem auxiliar a explicação das variações magnéticas das Terras Pretas Arqueológicas.

Os valores de  $SM_{bf}$  variaram de 0,0008 a  $0,0032 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  nas plantas C3, enquanto que na C4 foi de  $0,001 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  (Figura 6). A coloração acinzentada das amostras indica que maior parte da MO, um dos componentes para transformação termal, foi incinerada. Portanto, possivelmente toda ferridoxina pode ter sofrido transformação termal para Mh. De acordo com Houyuan e Dongsheng (2001), novas evidências de que cinzas de plantas C3 e C4 podem contribuir nos valores de SM dos grãos superparamagnéticos. Em seu estudo, Houyuan e Dongsheng (2001) concluíram que as cinzas de plantas com sistema fotossintético C3 possuem valores de  $SM_{bf}$  entre 0,44 a  $1,23 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , enquanto que as cinzas de plantas C4 possuem valores de  $SM_{bf}$  entre 2 a  $6 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , valores superiores ao encontrado neste trabalho.

A  $\chi_{fd}$  variou de 0 (zero) a 25 % nas C3 e na C4 a  $\chi_{fd}$  foi de 0 (zero) (Figura 6). Os valores de  $\chi_{fd}$  também podem estar relacionados às condições ambientais e antropogênicas que favorecem a formação de novos minerais e, conseqüentemente a variação da SM. Essa pode ser uma das causas de variabilidade nas leituras de  $SM_{bf}$  e  $\chi_{fd}$  a ser considerada para as TPAs, sendo considerada a hipótese fitogenética.

Mesmo que em baixas concentrações estes minerais formados a partir do ferro das plantas em contato com o fogo, pode se acumular no solo ao longo de vários anos e até mesmo séculos. Essa foi a mesma resposta dada por Houyuan e Dongsheng (2001) para explicar a variação magnética em solos areníticos da China, sem a presença inicial de minerais superparamagnéticos. Neste sentido, a pequena quantidade de material usado para leitura pode não ter sido suficiente para caracterizar a SM em valores mais elevado. Assim, o efeito residual de acúmulo de minerais provenientes da queima da ferridoxina das plantas pode ser considerado como um dos fatores de influência na variação da suscetibilidade magnética na Terra Preta Arqueológica. Estes resultados podem ser úteis e direcionar pesquisas

futuras sobre qual a melhor matéria-prima para produção da TPA em relação a concentração de ferro, temperatura e tempo de exposição ao fogo.



**Figura 6.** Suscibilidade magnética em baixa frequência (SMbf) e porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente ( $\chi_{fd}$ ) das cinzas de plantas de ciclo fotossintético C3 e C4 e fragmentos de cerâmica com ocorrência em áreas de terra arqueológica.

Para as amostras dos fragmentos cerâmicos presente em solos com TPAs, nota-se que as amostras avaliadas apresentaram  $\chi_{fd}$  entre 5,04 a 7,65% enquanto

que os valores de SMbf variaram de 1,65 a 15,08  $10^{-6}$  m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> (Figura 6). Estes valores podem estar relacionados aos minerais com propriedades magnéticas elevadas, como Mh em baixas concentrações encontradas em cerâmicas de TPAs. Alguns trabalhos identificaram Mh em fragmentos de cerâmica em TPA (COSTA et al., 2004; SERGIO et al., 2006). Já Silva et al. (2011), encontraram principalmente a presença de Mh, mineral não observado em solos não antrópicos adjacentes. Nos trabalhos de Costa et al. (2004) e Sergio et al. (2006), os autores também observaram a ocorrência de Mh em TPA e em fragmentos de cerâmicas encontradas nas TPAs. De acordo com Costa et al. (2004), a presença desse mineral explica o magnetismo mostrado nas cerâmicas.

Para Sergio et al. (2006), outra provável rota de origem da Mh em horizontes antrópicos está relacionada à exposição desses compostos a elevadas temperaturas. Portanto, também é provável que a Mh observada (Figura 4) seja resultante da degradação da cerâmica, ou também originada de queimadas frequentes que eram feitas nesses ambientes. Além disso, segundo Silva et al. (2011), a ocorrência de Hm no material magnético aponta que esse mineral está associado à Mh, provavelmente revestindo os agregados, sendo mais uma justificativa dos valores de SM mais elevados nas TPAs, em relação a solos não antropogênicos encontrados na Amazônia.

Apesar das leituras magnéticas terem demonstrado grande potencial de aplicação na região amazônica em diferentes escalas de trabalho, é preciso esclarecer algumas questões que ainda não são bem compreendidas sobre as diferentes causas de variação da SMbf, dentre elas a influência do fogo de incêndios naturais (SPOKAS et al., 2015), ou aqueles realizados pelos povos que habitavam a Amazônia e que de alguma forma, podem ter contribuído para a formação destes solos.

Neste sentido, a hipótese antropogênica vem confirmar a influência do fogo na transformação de minerais magnéticos, conforme relatado na literatura (BARRÓN; TORRENT, 2013; SPOKAS et al., 2015). A influência fitogênica pode afetar na formação dos minerais, conforme Houyuan e Dongsheng (2001) que relataram valores de SM nas plantas. Portanto, os valores de SM das plantas encontrados no presente trabalho foram muito baixos, que pode ser justificado por

alguns motivos, dentre eles: i) a metodologia aplicada não foi suficiente para captar magnetismo ou expressar o máximo de magnetismo e a presença de minerais nas plantas avaliadas, ii) o método de leitura do aparelho de SM e para avaliação da presença de minerais são adaptados para leitura de minerais presentes em solo e não em plantas, e, iii), o preparo das amostras e a quantidade de material para leitura da SM das plantas em laboratório não foi adequado, o que não permitiu a expressão do magnetismo após o preparo das amostras das plantas. Com isso, vale salientar a importância de adaptação de métodos que visem à leitura da SM e a presença de minerais em plantas (formas de ferro nas plantas após a queima), sendo este estudo, base para futuras pesquisas na área.

É possível apontar a presença de fragmentos cerâmicos nas TPAs e o uso do fogo (hipótese antropogênica), provavelmente sejam as hipóteses mais aceitas para a variação e os valores de SM apresentados neste trabalho. Os valores da SM das cerâmicas foram mais elevados que os apresentados nos solos (TFSA), uma vez que devido a sua formação com uso de fogo, podem ter levado a formação e/ou concentração de maiores teores de minerais magnéticos. As cinzas das plantas também podem contribuir nos valores de SM, uma vez que este processo de queima vem sendo cumulativo nestes solos ao longo de vários anos e até mesmo séculos.

Vale salientar, que em alguns trabalhos na literatura como os de Costa et al. (2004) e Sergio et al. (2006), foram encontrados Mh nos fragmentos e nos solos de TPAs. Sendo assim, o presente trabalho apresenta novos estímulos e sinaliza a necessidade de estudos que investiguem a formação das TPAs. Estes estudos deverão levar em consideração a influência das ações humanas com o uso do fogo (hipótese antropogênica), a composição florística da região (hipótese fitogenética), o clima, a formação e presença de fragmentos de cerâmicas nestes solos, além de muitos outros fatores que podem surgir ao longo de novas pesquisas.

## **2.4 CONCLUSÕES**

A suscetibilidade magnética é maior nos horizontes antrópicos dos perfis com terra preta arqueológica, diminuindo em profundidade, possivelmente em razão da ação antrópica com uso do fogo e presença de fragmentos de cerâmica que contribuem para a presença de minerais com elevada expressão magnética.

A porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente tem maior variação em subsuperfície nas terras pretas arqueológicas, devido à mistura e acúmulo de minerais formados em condições normais (pedogenética e/ou litogenética), além da influência do fogo (hipótese pedogênica).

Os fragmentos de cerâmicas têm maior suscetibilidade magnética em comparação aos solos com terra preta arqueológica (terra fina seca ao ar), podendo ser uma das justificativas dos maiores valores de suscetibilidade magnética em relação ao solo não antropogênico.

As cinzas das plantas apresentaram baixos valores de suscetibilidade magnética, indicando a influência litogenética nos valores de SM das TPAs pode ocorrer em razão do processo cumulativo de queima das plantas ao longo dos anos, no entanto, estes dados devem ser melhores estudados, com ajustes na metodologia de avaliação da suscetibilidade magnética e determinação dos minerais formados a partir da queima das plantas.

## 2.5. REFERÊNCIAS

BARRIOS, M. R.; MARQUES JUNIOR, J.; MATIAS, S. S. R.; PANOSSO, A. R.; SIQUEIRA, D. S.; SCALA JUNIOR, N. Magnetic susceptibility as indicator of soil quality in sugarcane fields. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.30, n.1, p.287-295, 2017.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Iron, manganese and aluminium oxides and oxyhydroxides. In: NIETO, F; LIVI, K.J.T. (Ed.). **Minerals at the Nanoscale**. Twickenham: EMU Notes in Mineralogy, 2013. p. 297–336.

BATISTA, M.A.; COSTA, A.C.S.; SOUZA JUNIOR, I.G. & BIGHAM, J.M. Crystallochemical characterization of synthetic Zn-substituted maghemite ( $\gamma$ -Fe<sub>2-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>3</sub>). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n.2, p.561-568, 2008.

BRASIL. **Ministério das Minas e Energia**. Projeto Radambrasil, folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro, 1978. 561 p.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, L. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física do solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 96p. (Boletim Técnico, 106).

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, M. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SOUZA, R. V. C. C.; ALMEIDA, M. C. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.3, p.598-609, 2011.

CAMPOS, M. C. C.; SANTOS, L. A. C.; SILVA, D.M.P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOARES, M.D.R. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Agro@ambiente On-line**, Roraima, v. 6, n.2, p. 102-109, 2012.

COSTA, A.C.S.; BIGHAM, J.M.; RHOTON, F.E. & TRAINA, S.J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays Clay Minerals**, New York, v.47, n.4, p.466-473, 1999.

COSTA, M. L.; KERN, D. C.; PINTO, A. H. E. & SOUZA, J. R. T. The ceramic artifacts in archaeological black earth (Terra Preta) from lower Amazon region, Brazil. **Acta Amazonica**, Manaus, v.34, n.2 , p.165-178, 2004.

CPRM - CENTRO DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens**. Manaus, 2001. 93p. (Relatório Técnico).

CURI, N.; FRANZMEIER, D.P. Toposequence of Oxisols from the central plateau of Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 2, p. 341-346, 1984.

DEARING, J. **Environmental magnetic susceptibility**: Using the Bartington MS2 System. 2.ed. Kenilworth, Chi Publishing, 1999. 54p.

DEARING, J.A. **Environmental magnetic susceptibility**. Using the Bartington MS2 system. England: British Library, 1994. 104p.

DICK, D. P. **Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B Latossólicos**. 1986. 196 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

DUNSHENG, X.; MING, J.; XIUMING, L.; FAHU, C.; JIANYING, M.; HUI, Z.; XUNMING, W.; HAITAO, W. A preliminary study on the magnetic signatures of modern soil in Central Asia. **Frontiers of Earth Science in China**, Beijing, v.1,n.3, p. 275-283, 2007.

EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 1997. 212p.

FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**, Amsterdam, v.96, n.1-2, 81-99, 2000.

GRIMLEY, D.A.; ARRUDA, N.K., BRAMSTEDT, M.W. Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible, and precise delineation of hydric soils in the Midwestern USA. **Catena**, Amsterdam, v.58, n.2, p.183– 213, 2004.

HOUYUAN, L.; DONGSHENG, L. The effect of C3 and C4 plants for the magnetic susceptibility signal in soils. **Science in China Series D: Earth Sciences**, Beijing, v. 44, n. 4, p. 318-325, 2001.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R., (eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, 2000. p. 107-138.

- KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Avaliação da estimativa de substituição de Fe por Al em hematitas de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 209-213, 1998.
- KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequência in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic Soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.29, n. 1, p.27-39,1982.
- LIMA, H. N.; MELLO, J. W. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; LIMA, A. M. N. Mineralogia e química de três solos de uma topossequência da bacia sedimentar do Alto Solimões, Amazônia ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.1, p.59-68, 2006.
- LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E.R.; MELLO, J. W. V.; GILKES, R. J.; KER, J. Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian Black Earth”) of Western Amazonia. **Geoderma**, Amsterdam, v.110, n.1, p.1–17, 2002.
- LU, S. G. Lithological factors affecting magnetic susceptibility of subtropical soils, Zhejiang Province, China. **Catena**, Amsterdam, 40, n.4, p.359-373, 2000.
- LU, S.G.; XUE, Q.F.; ZHU, L.; YU, J.Y. Mineral magnetic properties of weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China. **Catena**, Amsterdam, v.73, n.1, p.23-33. 2008.
- MAHER, B. Characterization of soils by mineral magnetic measurements. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v.42, n. 1-2, p.76-91, 1986.
- MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removed from soils and clays by dithionitecitrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, New York, v. 7, n. 1, p. 1317-327, 1960.
- MICHEL, F.M.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; MORALES, M.P.; SERNA, C.J.; BOILY, J.F.; LIU, Q.S.; AMBROSINI, A.; CISMASU, A.C.; BROWN, G.E. Ordered ferrimagnetic form of ferrihydrite reveals links among structure, composition, and magnetism. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**. USA v.107, n.7, 2787–2792, 2010.
- MULLINS, B.A. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.28, n. 2, p.223-246, 1977.
- NORRISH, K.; TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminum in soil goethites. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 12, n. 2, p. 294-306, 1961.
- OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; FERRAUDO, A. S. Multivariate technique for determination of soil pedoenvironmental indicators in Southern Amazonas. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.39, n.1, p.99-108, 2017.
- RESENDE, M.; SANTANA, D.P.; FRANZMEIER, D.P. & COEY, J.M.D. Magnetic properties of Brazilian Oxisols. In: **International Soil Classification Workshop**, Rio de Janeiro, 1988. Proceedings. Rio de Janeiro, 1988. p.78-108.
- SANTOS, L. A. C.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. M. P. ; MARQUES JUNIOR, J.; FRANÇA, A. B. C. Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n.4, p. 825-836, 2013.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Viçosa. 2015. 102p.

SCHWERTMANN, U.; CORNELL, R.M. **Iron oxides in laboratory**. New York: Cambridge, VCH, 1991. 137p.

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. **Soil Science**, Baltimore, v. 139, n. 4, p. 344-350, 1985.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in Soil Environments**. 2.ed. Madison: SSSA, 1989. p. 379-438.

SDS - SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL —**Relatório técnico síntese dos diagnósticos: Área estadual sul de Apuí e Manicoré**. Manaus. 20 p. 2004.

SERGIO, C.S.; SANTANA, G.P.; COSTA, G.M.; HORBE, A.M.H. Identification and characterization of maghemite in ceramic artifacts and archaeological black earth of Amazon region. **Soil Science**, Philadelphia, v. 171, n. 1, p. 59-64, 2006.

SILVA, A. R.; SOUZA JUNIOR, I.G.; COSTA, A.C.S. Suscetibilidade magnética do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.5, p.329- 337, 2010.

SILVA, F. W. R.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; MOTTA, M. B.; SANTANA, R.M. Caracterização química e mineralógica de solos antrópicos (Terras Pretas de Índio) na Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n.3, p. 673-681, 2011.

SINGER, M. J., BOWEN, L.H., VEROSUB, K. L., FINE, P., TENPAS, J. Mössbauer spectroscopy evidence for citrate-bicarbonate-dithionite extraction of maghemite from soils. **Clays and Clay Minerals**, New York , v.43, n.1 , p.1-7, 1995.

SPOKAS, K.; MARQUES JUNIOR, J.; LA SCALA, NEWTON.; NATER, E.; SIQUEIRA, D.S. **Black Earths (Terra Preta): Observations of wider occurrence from residual fire**. In: LAL, R. Encyclopedia of Soil Science, Second Edition -Two-Volume Set Encyclopedia of Soil Science, Second Edition. 2. ed. North Andover, Massachusetts: Aries Systems Corporation, 2015, p. 1-4

TORRENT, J.; BARRÓN, V.; LIU, Q.S. Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation. **Geophysical Research Letters**, Washington, v.33, n.2 , L02401, 2006.

YOEMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v.19, n.13, p.1467-1476, 1988.

ZEE - ZONEAMENTO ECOLÓGICO ECONÔMICO DO SUL-SUDESTE DO AMAZONAS. **Zoneamento Ecológico Econômico do Sul-Sudeste do Amazonas**. IPAAM, 2008. 53p.

### **CAPÍTULO 3 – Magnetismo da Terra Preta Arqueológica como indicador agrícola e ambiental**

**RESUMO** – A Amazônia apresenta grande diversidade de solos, com destaque para os com horizonte antrópico conhecidos como terra preta de índio (TPI) ou terra preta arqueológica (TPA), as quais apresentam grande importância econômica para a região e para o mundo. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo utilizar a suscetibilidade magnética (SM) como indicador agrícola e ambiental em uma área de Terra Preta de Arqueológica, localizada na região Sul do Amazonas, Brasil. O estudo foi realizado em um Argissolo Vermelho com horizonte antrópico ou TPA. Nesta área foi estabelecida uma malha de 70 m x 70 m, e o solo foi amostrado em espaçamento regular de 10 m na profundidade de 0,0-0,20 m. Foram determinados os atributos químicos (pH em água, matéria orgânica, fósforo, soma de bases, capacidade de troca de cátions, saturação por bases, carbono orgânico total e estoque de carbono orgânico total), físicos (textura e densidade do solo), formas de ferro (extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (FeDBC ou Fed), ferro extraídos por oxalato de amônio (FeOAA ou Feo)), SM e fluxo de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>). Para caracterização da variabilidade, foi realizada a estatística descritiva e geoestatística por meio do uso de semivariogramas cruzados para avaliação da relação espacial entre a suscetibilidade magnética e os atributos físicos, químicos, formas de ferro e FCO<sub>2</sub>. A SM pode ser utilizada na compreensão da variabilidade de alguns atributos agrícolas e ambientais em Terra Preta de Arqueológica. No entanto, a SM não apresenta potencial para determinar a variabilidade espacial da areia e argila, possivelmente devido à presença de fragmentos cerâmicos nestes solos. Os altos valores de SM podem estar associados com a presença de maghemita encontradas nos solos e nos fragmentos cerâmicos presentes nas TPAs. A suscetibilidade magnética apresenta padrão de variabilidade espacial similar ao fluxo de CO<sub>2</sub>, com os mesmos ajustes de semivariogramas, apresentando correlação espacial positiva entre FCO<sub>2</sub> e  $\chi_{fd}$  e correlação espacial negativa entre FCO<sub>2</sub> e SM<sub>bf</sub>. Locais com maior suscetibilidade magnética (4,7 a 5,1 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>) apresentaram 1,2 vezes mais CTC e emitiram 1,4 vezes menos CO<sub>2</sub> em comparação a áreas com menores valores magnéticos (3,5 a 3,9 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>).

**Palavras-chave:** fluxo de CO<sub>2</sub>, suscetibilidade magnética, variabilidade espacial.

### 3.1 INTRODUÇÃO

A floresta amazônica consiste em um ambiente em equilíbrio, no qual pequenas mudanças podem acarretar severas consequências à biodiversidade. Dentre os diversos tipos de solos existentes na região amazônica, os solos originados em áreas de terra preta arqueológica ou terra preta de índio (TPA ou TPI) apresentam grande importância econômica para a região e para o mundo. As TPA ocupam de 0,1% a 0,3% da bacia amazônica, e as informações a respeito do tamanho dos sítios de existência variam de menos de um hectare, em terraços elevados, paralelos aos rios, a 400 hectares (SOMBROEK et al., 2003).

Apesar dos estudos sobre as TPAs (LIMA et al., 2002, GERMAN, 2003; LEHMANN et al., 2003; GLASER, 2007; CAMPOS et al., 2013, AQUINO et al., 2016) algumas questões, como característica química, física, fluxo ou emissão de CO<sub>2</sub> e mineralogia de TPAs, precisam ser mais bem avaliadas. Neste sentido, alguns fatores intrínsecos as TPAs, podem contribuir para a alta variabilidade espacial dos seus atributos, conforme encontrado por Oliveira et al. (2015a). Uma destas características marcantes nas TPAs é a presença de fragmentos cerâmicos e material lítico, além do carvão pirogênico.

A elevada fertilidade das TPAs é atribuída às propriedades físico-químicas da matéria orgânica, principalmente pela contribuição significativa do carbono pirogênico, formado por oxidação incompleta de materiais orgânicos (DERENNE; LARGEAU, 2001) que exibem alta resistência à oxidação termal, química e até à foto-oxidação (SKJEMSTAD et al., 1996). A alta variabilidade das propriedades/atributos das TPAs pode ser explicada pela presença de fragmentos líticos e cerâmicos (CAMPOS et al., 2011). O uso intenso do fogo associado à deposição de material orgânico forma partículas organominerais estáveis semelhantes à fração areia (TEIXEIRA et al., 2009) e podem contribuir pela variação dos atributos dependentes da textura do solo.

Trabalhos recentes visando caracterização (CAMPOS et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2015a; AQUINO et al., 2016) e a variabilidade espacial de atributos de solos (AQUINO et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2015b, OLIVEIRA 2015c, CAMPOS et al., 2016; SILVA et al., 2016) em TPAs, foram desenvolvidos. Em seu trabalho, Oliveira et al. (2015b) avaliaram a variabilidade espacial e densidade amostral da

SM e dos atributos do solo em Argissolos da região de Manicoré, AM. Os autores concluíram que as áreas com TPA evidenciaram maior variabilidade espacial para alguns atributos, incluindo a argila, e que a suscetibilidade magnética evidenciou comportamento similar aos atributos do solo nos ambientes estudados, apresentando mesmos ajustes de semivariograma, podendo ser uma propriedade do solo utilizada como indicador para estimar/compreender os atributos destes solos.

Neste sentido, alguns métodos indiretos têm sido utilizados para representar a variabilidade de atributos dos solos, como Espectroscopia de Refletância Difusa (ERD) e SM dos solos. Em seu trabalho, Leal et al. (2015) utilizaram a SM para caracterizar os potenciais de emissões de  $\text{CO}_2$  em áreas agrícolas e verificaram ajustes de modelos esféricos para  $\text{FCO}_2$  e  $\text{SM}_{\text{bf}}$  da areia e argila e verificaram que houve correlação espacial negativa entre a SM e o fluxo de  $\text{CO}_2$  ( $\text{FCO}_2$ ), indicando que esta informação pode ser usada para definir a variabilidade espacial do  $\text{FCO}_2$ , especialmente para projetos de pesquisa que estudam a causa e efeito da relação entre mineralogia e  $\text{FCO}_2$ . No trabalho de Marques Junior et al. (2014), os autores utilizaram a SM e ERD para caracterizar a variabilidade espacial de atributos em um Luvisolo (Haplustalf) brasileiro e concluíram que o uso combinado da SM e ERD com técnicas de análise multivariada e geoestatística foram eficientes para caracterizar a variabilidade espacial das propriedades deste solo, o que pode auxiliar no mapeamento detalhado da relação de causa e efeito entre o solo e as colheitas em áreas semelhantes.

É comprovada a eficiência do uso de técnicas indiretas para caracterização dos atributos de solos tropicais, no entanto, em áreas com TPAs, o uso destas ferramentas ainda não foi realizado. Com isso, o trabalho tem como hipótese que a suscetibilidade magnética é uma ferramenta capaz de estimar a variabilidade espacial de atributos agrícolas e ambientais em áreas com terra preta arqueológica. Assim, visando contribuir para uma melhor compreensão e entendimento da sustentabilidade de solos com TPAs na Amazônia, o objetivo deste trabalho é compreender a variabilidade espacial de atributos ambientais (emissão de  $\text{CO}_2$  do solo), e agrícolas (relacionados a física e fertilidade), utilizando a suscetibilidade magnética como indicadora agrícola e ambiental, relacionando estes atributos com a composição mineralógica deste solo.

### **3.2 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **Caracterização do Meio Físico**

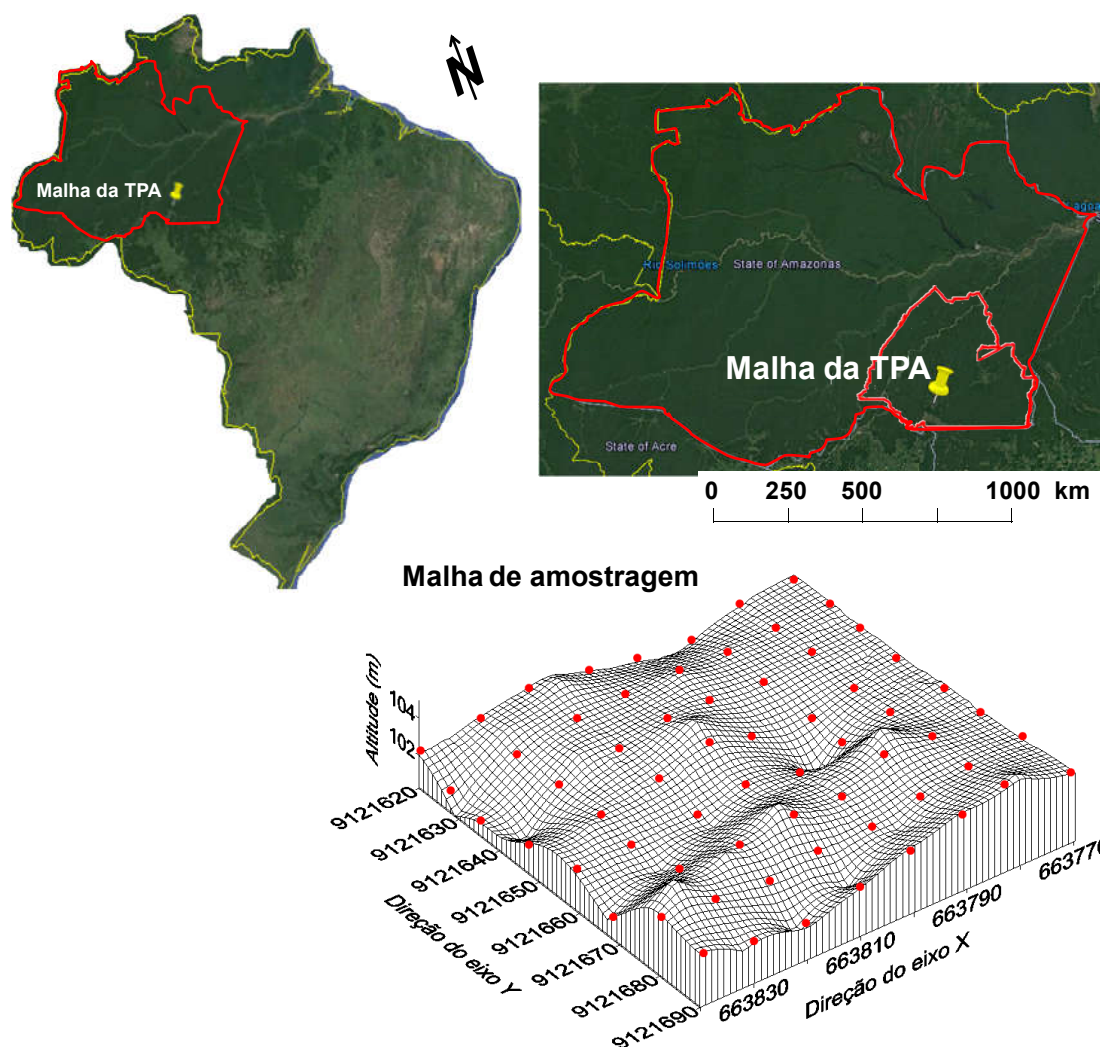
O estudo foi realizado nas imediações da comunidade Santo Antônio do Matupi, às margens da BR 230, rodovia Transamazônica, região de Manicoré, AM, localizada ao sul do estado do Amazonas, sendo mapeada uma área com presença de horizonte antrópico, denominada de terra preta arqueológica (TPA). A área está situada nas coordenadas geográficas de 07° 55' 02,1" de latitude Sul e 61° 31' 45,2" longitude oeste, com altitude média de 102 m. A área estava submetida ao cultivo de milho com aproximadamente 120 dias após o plantio, sendo que não foi adubada e somente sofreu processo de queima do material vegetal antes do plantio, para preparo da área.

A região apresenta configuração do relevo marcada pela presença de platôs nas partes mais elevadas, apresentando superfícies planas, e por planície nas partes mais baixas, que tem como principais características a presença de uma superfície pediplanada, localmente interrompida por colinas de topo plano (CPRM, 2001). O material de origem é proveniente da alteração de granitos Rondonianos, do Pré-Cambriano Superior, sedimentos coluviais, depositados nas partes mais baixas da paisagem, e coberturas terciárias (BRASIL, 1978). O solo foi classificado como Argissolo Vermelho (EMBRAPA, 2013) e a vegetação primária da região é Floresta Tropical Densa. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical chuvoso, apresentando um período seco de pequena duração (Am), temperaturas variando entre 25 e 27 °C e precipitação média anual de 2.500 mm, com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho e umidade relativa do ar entre 85 e 90%.

#### **Metodologia de Campo**

Foi estabelecida uma malha de 70 x 70 m abrangendo 0,49 hectares. O solo foi amostrado nos pontos de cruzamento da malha, com espaçamentos regulares de 10 em 10 metros, perfazendo um total de 64 pontos amostrais (Figura 1). Esses pontos foram georreferenciados com um equipamento de GPS Garmin Etrex (South American'69). Em seguida, foi realizada sob cada ponto amostral a coleta de amostras de solos deformadas e indeformadas na profundidade de 0,0-0,20 m. Este trabalho dará continuidade a proposta Oliveira et al. (2015b) e projetos

multidisciplinares financiados pelo convênio FAPESP/FAPEAM (Processo: 09/53368-0).



**Figura 1.** Mapa de localização e modelo de elevação digital da área de estudo.

### **Análises físicas e químicas**

A caracterização física foi realizada por Oliveira et al. (2015b) (Tabela 1). Os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) trocáveis, fósforo (P disponível) e o pH em água (pH H<sub>2</sub>O) foi caracterizada por Oliveira et al. (2015b). Com base nos teores dos atributos de fertilidade do solo, foram calculados a saturação por bases (V%), capacidade de troca de cátions (CTC) e soma de bases (SB).

O carbono total foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yoemans e Bremner (1988). O estoque de carbono orgânico total (ECOT) calculado pela expressão (VELDKAMP, 1994) (1):

$$ECOT = (COT \times Ds \times e)/20 \quad (1)$$

em que,

ECOT = estoque de C orgânico em determinada profundidade ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ );  
COT = teor de carbono orgânico total na profundidade amostrada ( $g \text{ kg}^{-1}$ );  
Ds = densidade do solo da profundidade ( $kg \text{ dm}^{-3}$ ); e = espessura da camada considerada (no caso 20 cm).

### **Fluxo de CO<sub>2</sub>, umidade de Temperatura do solo**

As medições do Fluxo de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>), temperatura e umidade foram realizadas por Aquino (2013). As leituras foram realizadas no período da manhã (entre 8h00 e 10h00), em cada ponto amostral da malha, sendo realizadas leituras apenas no período da manhã em função da distância e do difícil acesso a área estudada. O FCO<sub>2</sub> foi registrada utilizando-se de um sistema portátil da companhia LI-COR (LI-8100), Nebraska EUA. Em seu modo de medição, o sistema monitora as mudanças na concentração de CO<sub>2</sub> dentro da câmara por meio de espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho (IRGA).

A câmara para solos tem um volume interno de 854,2 cm<sup>3</sup>, com área de contato de 83,7 cm<sup>2</sup>, sendo acoplada sobre os colares de PCV previamente inseridos no solo, a uma profundidade de 3 cm em cada um dos pontos amostrais. Uma vez a câmara fechada, o modo de medida levou 1min e 30s em cada ponto para a determinação de FCO<sub>2</sub> e, dentro da câmara, a concentração de CO<sub>2</sub> foi determinada a cada 2,5s.

A temperatura do solo (T °C) foi monitorada por um sensor de temperatura (termistor portátil), parte integrante do sistema do LI-8100, inserido na camada de 0-12 cm de profundidade. A umidade do solo (Us) também foi medida em todos os pontos, utilizando-se um sistema portátil TDR-Campbel® (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Australia), que avaliou a umidade disponível do solo (% volume) na camada de 0-12 cm.

### **Teores de ferro**

A determinação dos teores de ferro relativo à totalidade dos óxidos de ferro pedogenéticos extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (FeDBC) ou simplesmente ferro ditionito (Fed) seguiu a metodologia de Mehra e Jackson (1960),

e a determinação dos teores de ferro extraídos por oxalato de amônio (FeOAA) ou simplesmente ferro oxalato (Feo), relativos aos óxidos de ferro pedogenéticos de baixa cristalinidade seguiu a metodologia citada por Camargo et al. (1986).

### Suscetibilidade magnética

A suscetibilidade magnética (SM) foi determinada na TFSA (terra fina seca ao ar) no laboratório utilizando equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B. A avaliação foi feita em alta e baixa frequência (SMaf: alta – 4,7 kHz e SMbf: 0,47 kHz) (DEARING, 1994; COSTA et al., 1999). Segundo estes autores, as medições de dupla frequência (alta e baixa) devem ser utilizadas em estudo de caráter qualitativo para indicar a presença de minerais magnéticos de domínio simples e múltiplos. No caso de única leitura, para obtenção de resultados mais precisos é indicado o uso da baixa frequência (BARTINGTON, 2013).

A presença de minerais pedogenéticos foi determinada a partir da diferença entre SM medida na baixa e alta frequência, sendo o resultado expresso em porcentagem da SM de frequência dependente ( $\chi_{fd}$ ) (DEARING, 1994) (equação 2).

$$\chi_{fd} = \frac{(SMbf - SMaf)}{SMbf} \times 100 \quad (2)$$

em que,

$\chi_{fd}$  é a porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente; SMbf é a SM avaliada na baixa frequência; SMaf é a SM avaliada na alta frequência.

Os valores da  $\chi_{fd}$  foram classificados com base em Dearing (1994).

**Tabela 1.** Caracterização física e química do solo e estatística descritiva.

Atributos (Unid.)	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	D.P	Var.	CV (%)	Assim.	Curt.	d
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	*434,14	442,48	263,98	551,60	58,83	3.461,46	*13,55	*-1,13	1,85	*0,12**
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	*121,51	120,00	42,90	250,30	42,54	1.810,01	*35,01	*0,61	0,32	*0,09**
Ds (kg dm <sup>-3</sup> )	*0,89	0,88	0,61	1,04	0,08	0,01	*9,40	*-0,43	0,99	*0,08**
pH (H <sub>2</sub> O)	*6,27	6,20	5,70	7,10	0,30	0,09	*4,70	*0,58	0,48	*0,09 <sup>ns</sup>
MO (g dm <sup>-3</sup> )	*68,19	68,00	29,00	94,00	13,54	183,30	*19,86	*-0,26	0,31	*0,06 <sup>ns</sup>
P (mg dm <sup>-3</sup> )	*309,39	298,50	165,00	547,00	86,40	7.465,00	*27,93	*0,53	-0,02	*0,07 <sup>ns</sup>

\*Dados publicados por Oliveira et al. (2015b). Ds - densidade do solo; MO – matéria orgânica; P – fósforo disponível; d= teste de normalidade, \*\*significativo pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

### Análises estatísticas e geoestatística

Foi realizada análise exploratória dos dados, calculando-se média, mediana, coeficiente de variação, desvio padrão, variância, coeficiente de assimetria, curtose

e o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov. O coeficiente de variação (CV%) foi classificado com base no critério de Warrick e Nielsen (1980) que classifica o CV como baixo < 12%, médio de 12% a 24% e alto > 24%.

A determinação da existência da dependência espacial foi realizada por meio da análise geoestatística (MATHERON, 1963; VIEIRA et al., 1983; ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Sob teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela Equação 3, por meio do programa GS<sup>+</sup> (ROBERTSON, 1998):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (3)$$

em que,

$\hat{\gamma}(h)$  - valor da semivariância para o vetor  $h$ ;  $N(h)$  - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;  $Z(x_i)$  - valor do atributo  $Z$  na posição  $x_i$ ;  $Z(x_i+h)$  - valor do atributo  $Z$  separado por uma distância  $h$  da posição  $x_i$ .

Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, a escolha foi baseada no coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e nos parâmetros, coeficientes linear e angular, obtidos nos procedimentos de validação cruzada (dados não apresentados) e na menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR) (VIEIRA, 2000). Na análise do grau de aleatoriedade espacial ou grau de dependência espacial (GDE -  $[(C_0/(C_0+C_1))] * 100$ ) das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), onde valores de GDE menores que 25 % são considerados dependência espacial forte, entre 25 e 75 % indicam dependência espacial moderada e valores maiores que 75 %, dependência espacial fraca. Na Tabela 2 apresenta os dados da caracterização espacial de atributos físicos e químicos.

**Tabela 2.** Caracterização espacial de atributos físicos e químicos

Atributos	Transformação	Modelo	$C_0$	$C_0+C_1$	$a$	GDE (%)	SQR	$R^2$
Areia	-	Exponencial	189,00	3.073,00	31,20	67,50	$1,12e^{-06}$	0,89
Argila	-	Exponencial	3,00	1.612,00	19,80	99,00	-	0,95
Ds	Log	Exponencial	0,001	0,005	58,02	50,10	$3,51e^{-07}$	0,90
pH (H <sub>2</sub> O)	Log	Esférico	0,01	0,06	32,70	63,90	$3,13e^{-05}$	0,65
MO	-	Esférico	38,40	117,00	33,10	50,00	46,20	0,77
P	EPP	-	-	-	-	-	-	-

Dados publicados por Oliveira et al. (2015b). Ds - densidade do solo; MO - matéria orgânica; P - fósforo disponível.

Com base nos parâmetros dos semivariogramas experimentais dos atributos do solo, foram utilizados os semivariogramas escalonados com o objetivo de reduzi-los à mesma escala, facilitando a comparação entre resultados de diferentes variáveis (CEDDIA et al., 2009). Os semivariogramas experimentais foram escalonados por meio da divisão das semivariâncias pela variância estatística (GUIMARÃES, 1993). A escolha do modelo de semivariograma escalonado que melhor se ajustou aos dados foi realizada com base no menor resíduo gerado com o ajuste do modelo, além do conhecimento prático do comportamento dos atributos nos ambientes.

Os semivariogramas experimentais escalonados foi ajustado ao modelosesférico (Equação 4), identificados nas figuras como: Esf. ( $C_0$ ,  $C_1+C_0$ , [(GDE)],  $R^2$ ,  $a$ , SQRes.):

$$\begin{cases} \hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right], & \text{se } 0 < h < a \\ \hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1, & \text{se } h \geq a \end{cases} \quad (4)$$

em que:

$C_0$ : efeito pepita;  $C_0+C_1$ : patamar; GDE: grau de dependência espacial;  $a$ : alcance do semivariograma;  $h$ : distância de separação entre duas observações;  $a$ : o alcance de dependência espacial;  $R^2$ : coeficiente de determinação; e SQRes: soma dos quadrados dos resíduos.

No sentido de averiguar a correlação espacial entre a SMbf e  $\chi_{fd}$  e atributos agrícolas e ambientais do solo (argila, areia, Ds, MO, FCO<sub>2</sub>, Us, T °C, SB, CTC, V% FeDBC e FeOAA), foi realizada a análise de semivariograma cruzado, que evidencia a ocorrência ou não da dependência espacial entre duas variáveis amostradas nos mesmos locais e que apresentam certo grau de correlação. Se existir dependência espacial para cada uma das variáveis (Z1 e Z2), a existência de dependência espacial entre Z1 e Z2 pode ser testada. O cálculo do semivariograma cruzado é usado para avaliar a autocorrelação espacial entre os pares de variáveis (Z1 e Z2) (DEUTSCH; JOURNEL, 1998) (Equação 5):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)][y(x_i) - y(x_i+h)] \quad (5)$$

em que:

$\hat{\gamma}(h)$  - valor da semivariância para o vetor  $h$ ;  $N(h)$  - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;  $Z(x_i)$  - valor do atributo  $Z$  na posição  $x_i$ ;  $y(x_i)$  o valor da variável secundária no ponto  $i$ ;  $Z(x_i+h)$  - valor do atributo  $Z$  separado por uma distância  $h$  da posição  $x_i$ .

Como os pontos de amostragem de SMbf e  $\chi_{fd}$  e os demais atributos (argila, areia, Ds, MO, FCO<sub>2</sub>, Us, T °C, SB, CTC, V% FeDBC e FeOAA) são exatamente os mesmos e na mesma densidade de amostragem, foi construído apenas o semivariograma cruzado para verificar a correlação da dependência espacial, pois não haverá ganho no uso de cokrigagem em relação à demais krigagens. No sentido de afirmativa das correlações espaciais entre os atributos, foi realizada a correlação linear de Pearson agrupando cada atributo em 10 grupos considerando o valor mínimo e máximo, determinando-se o grau de coeficiente de correlação ( $r$ ). Para tal procedimento, foi realizado com o auxílio do programa estatístico Statistica 7.0 (STATISTICA, 2005).

Os valores interpolados por meio da krigagem foram usados para construção de mapas dos atributos avaliados, com uso do programa Surfer Surfer 8.0 (GOLDEN SOFTWARE Inc., 1999). O erro relativo dos mapas de distribuição espacial foi determinado a partir da subtração dos valores observados pelos estimados pela krigagem ordinária durante o procedimento da validação cruzada. Posteriormente, estes valores foram espacializados utilizando a Interpolação pelo Inverso do Quadrado da Distância (Inverse Distance Weighting - IDW).

A vantagem deste método está em sua praticidade de comparação dos mapas de diferentes variáveis. A construção dos mapas espaciais ou mapas de isolinhas serviram de base para visualização das relações espaciais entre as propriedades magnéticas e os atributos agrícolas e ambientais.

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva mostrou que quase todos os atributos apresentam valores de assimetria próximos à zero, o que representa simetria dos dados, possibilitando a aplicação das técnicas geoestatísticas a estes atributos (Tabela 3). Observa-se que os valores de média e mediana de quase todos os atributos estudados estão próximos, evidenciando que as mesmas aproximam-se de uma

distribuição normal, ou seja, estes não apresentam influência de valores extremos. Isso pode ser um indicativo que os dados seguem distribuições simétricas, sendo estes valores justificados pelos valores de assimetria e curtose próximos de zero.

Elevados teores de SB, CTC e V%, além dos atributos COT e ECOT (Tabela 2), explicam a alta fertilidade das TPAs. Segundo Kern e Kämpf (1989), Lehmann et al. (2003) e Glaser (2007), solos de TPA geralmente apresentam alta fertilidade natural, com elevados teores de P, Ca, Mg, zinco (Zn), manganês (Mn), e com teor elevado de matéria orgânica estável. Para Cunha et al. (2007) a alta fertilidade destes solos é fortemente relacionada com as características moleculares da fração alcalino-solúvel do carbono orgânico. Estes autores encontraram que os horizontes A de solos antropogênicos da Amazônia apresentaram maior teor de carbono total, comparados aos de solos adjacentes não antropogênicos que não apresentaram horizonte A antrópico. O valor de COT variou de 16,82 a 54,52 g kg<sup>-1</sup>, conforme encontrado por Campos et al. (2011). Os teores mais elevados de COT das TPAs são atribuídos ao acúmulo de material orgânico (KERN; KÄMPF, 1989).

**Tabela 3.** Estatística descritiva dos atributos do solo em área de terra preta arqueológica.

Atributos (Unid.)	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	D.P	Var.	CV (%)	Assim.	Curt.	d
ECOT (Mg ha <sup>-1</sup> )	35,15	35,27	10,26	51,79	7,26	52,70	20,65	-0,42	1,40	0,09***
COT (g kg <sup>-1</sup> )	39,55	39,44	16,82	54,52	7,85	61,68	19,86	-0,27	0,31	0,10***
SB (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	197,19	195,2	103,8	252,6	29,18	851,7	14,80	-0,46	0,58	0,09***
V (%)	87,20	86,79	78,12	93,66	3,59	12,87	4,11	-0,20	-0,47	0,09***
CTC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	225,49	227,65	128,80	274,40	27,74	769,48	12,30	-0,61	1,15	0,08***
FCO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	*7,58	*7,04	3,32	16,02	2,41	5,82	31,79	0,86	1,38	0,10***
T (°C)	*26,78	*26,64	*25,64	*28,27	0,62	0,40	*2,34	0,46	-0,67	0,13***
Us (%)	*21,03	*21,00	*12,00	*37,00	5,24	27,40	*24,90	0,34	0,02	0,10***
FeDBC (g kg <sup>-1</sup> )	27,61	27,44	*23,66	*34,32	2,42	5,85	*8,76	0,67	0,44	0,10***
FeOAA (g kg <sup>-1</sup> )	3,32	3,32	1,49	4,79	0,60	0,36	18,14	0,04	0,66	0,07 <sup>ns</sup>
SMBf (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	**4,29	4,26	1,46	7,07	0,93	0,87	**21,87	**0,13	1,46	**0,06 <sup>ns</sup>
χ <sub>fd</sub> (%)	6,89	6,80	0,32	18,49	3,67	13,46	53,22	0,32	0,32	0,07 <sup>ns</sup>

\* antes dos valores são dados publicados por Aquino (2013); \*\*antes dos valores são dados publicados por Oliveira et al. (2015b). CV - Coeficiente de variação; D.P - desvio padrão; Var. - variância; Assim. - assimetria; Curt. - Curtose; d - teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov; <sup>ns</sup> e \*\*\*- Não significativo e significativo pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, respectivamente. Unid. - Unidades equivalentes as médias de cada atributo; ECOT - estoque de carbono orgânico total; ECOT= estoque de carbono orgânico total; COT - carbono orgânico total; FCO<sub>2</sub> - emissão de CO<sub>2</sub> do solo; T °C – temperatura do solo; Us – umidade do solo; FeOAA - teores de ferro extraídos por oxalato de amônio (Feo); FeDBC - teores de ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed); SMBf - suscetibilidade magnética em baixa frequência; χ<sub>fd</sub> - porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente.

Elevados teores de matéria orgânica favorecem a redução da emissão de gases de efeito estufa. Conforme destacado por Aquino (2013), os valores de FCO<sub>2</sub>

variaram de 3,32 a 16,02 e média de 7,58  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Tabela 3), são considerados elevados, sendo que o processo de emissão de  $\text{CO}_2$  do solo está associado à atividade microbiana, respiração das raízes, decomposição dos resíduos vegetais, oxidação da matéria orgânica do solo (LAL, 2009). Trabalhos indicam que as variações temporais da emissão de  $\text{CO}_2$  do solo podem ser atribuídas às variações nos teores de água e temperatura do solo (TEDESCHI et al., 2006; OHASHI; GYOKUSEN, 2007). (Tabela 3). Estas variações espaciais do  $\text{FCO}_2$  podem ser controladas pela  $D_s$  (SAIZ et al., 2006), onde vários estudos comprovam relação espacial entre elas (TEIXEIRA et al., 2013; LEAL et al., 2015). Os baixos valores de  $D_s$  (Tabela 1) estão relacionados aos elevados teores de MO e COT, conforme destacado por Steinbeiss et al. (2009). Os teores elevados de COT das TPAs (39,55  $\text{g kg}^{-1}$ ) podem contribuir para a formação de alguns minerais, como a maghemita e esses altos valores de COT são atribuídos ao acúmulo de material orgânico (KERN; KÄMPF, 1989) e, principalmente, aos resíduos de queimadas (SMITH, 1980).

Os valores de FeOAA variaram de 1,49 a 4,79  $\text{g kg}^{-1}$  (Tabela 3), o que expressa indiretamente a presença de minerais menos cristalizados formados em grande parte das vezes na solução do solo, especialmente Gt e ferrihidrita não magnética (MCKEAGUE; DAY, 1966; BARRÓN; TORRENT, 2013). Os teores de FeDBC variaram de 23,66 a 34,32  $\text{g kg}^{-1}$ , indicando que possa se encontrar a presença de minerais mais cristalizados, como Hm (INDA JUNIOR, 2002), maghemita e ferridrita ferrimagnética. Foi observado maiores teores de FeDBC que o FeOAA. As condições ambientais (alta umidade, elevadas precipitações pluviométricas e boa drenagem) possivelmente foram favoráveis à formação dos minerais de maior cristalinidade, sendo também encontrados minerais de baixa cristalinidade (FeOAA) em menores quantidades.

Continuando a discussão iniciada por Oliveira et al., (2015b), sobre a SM, o valor da suscetibilidade magnética em baixa frequência ( $\text{SM}_{bf}$ ) variou de 1,46 a 7,07  $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , com média de 4,29  $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  (Tabela 3). Os valores da  $\text{SM}_{bf}$  nos solos estão associados a presença do mineral litogenético magnético (RESENDE et al., 1988), enquanto que os valores magnéticos nos ambientes sedimentares estão associados a maior presença de minerais pedogenéticos, como

a maghemita e a ferridrita ferrimagnética (DEARING, 1994; DUNSHENG et al., 2007; MICHEL et al., 2010; TORRENT; LIU; BARRÓN, 2010).

Os valores de  $S_{mbf}$  também estão diretamente relacionados ao teor de ferro total do solo e da rocha ( $Fe_2O_3$ ) (SANTANA, 1984; RESENDE et al., 1988) e ao ambiente pedogenético (DEARING, 1994), e possivelmente quanto a formação de maghemita e a ferridrita ferrimagnética, presentes na fração argila, mesmo em baixas concentrações, conforme encontrado por Souza Junior et al. (2010). No entanto, no presente estudo o material é de origem granítica, e os valores de suscetibilidade magnética estão, em média, relativamente abaixo daqueles característicos da maghemita (maghemita pura com valor de 410 a 440  $10^{-6} m^3 kg^{-1}$ ) (DEARING, 1994), porém o valor máximo encontrado para SM de 7,07  $10^{-6} m^3 kg^{-1}$  (equivalente a aproximadamente 1,63 % de maghemita) na TPA sinaliza a necessidade de estudos que investiguem a presença de minerais ferrimagnéticos, uma vez que estes podem se apresentar em baixas concentrações nestes solos, conforme relatado por Souza Junior et al. (2010).

A presença de maghemita (mesmo em baixas concentrações) na fração argila das TPAs, conforme encontrado por estudos de Costa et al. (2004), Sergio et al. (2006) e Silva et al. (2011), pode ter sua gênese creditada à queima de resíduos orgânicos na presença de óxidos como Gt e Hm. Segundo Mullins (1977) e Schwertmann e Cornell (1991), um dos mecanismo de formação de maghemita no solo se dá pela queima de outros óxidos de ferro, como a Gt e a Hm, na presença de material orgânico. Em seu estudo, Silva et al. (2011) observaram principalmente a presença de maghemita em solos de TPAs, mineral não observado em solos não antrópicos adjacentes. Neste caso, em condições de formação de solo sem a presença de fogo, durante a pedogênese, a formação da maghemita pode ser advinda da oxidação do ferro ( $Fe^{2+}$ ) da magnetita durante o intemperismo (RESENDE et al., 1988; SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989; FONTES; WEED, 1991). Lourenço et al. (2014), encontraram maiores valores de SM em amostras retiradas dos horizontes de superfície, o que está relacionado com a contribuição ferrimagnética de partículas antropogênicas.

Os valores da porcentagem da suscetibilidade magnética de frequência dependente ( $\chi_{fd}$ ) variaram de 0,32 a 18,49%, com média de 6,89% (Tabela 3). Os

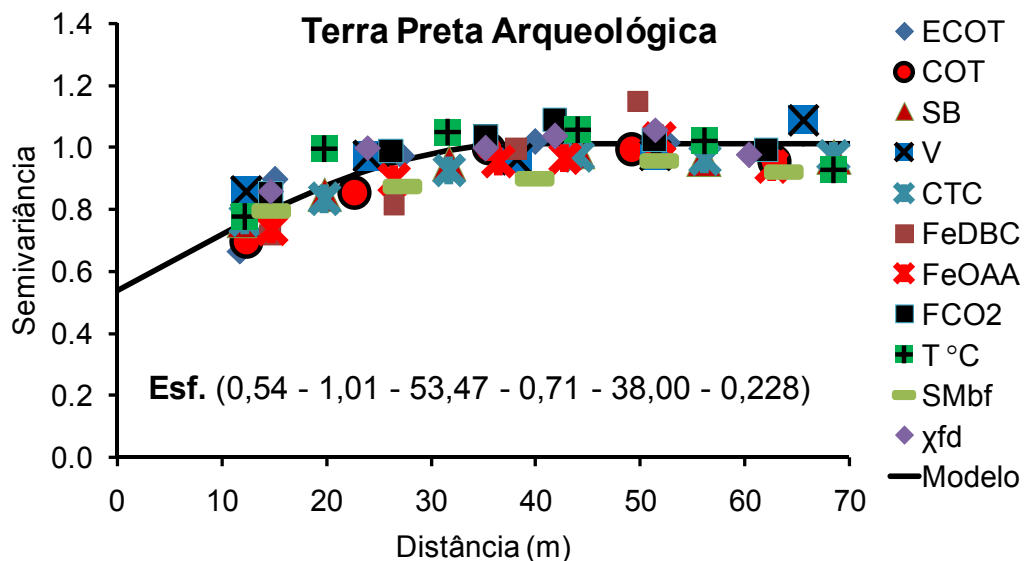
maiores valores de  $\chi_{fd}$  indicam que para a escala do estudo, prevalecem minerais superparamagnético (SP) de diâmetro  $\sim 0,03 \mu\text{m}$ . Nestes locais os valores de  $\chi_{fd}$  também podem estar relacionados a anisotropia magnética e efeito do fogo na formação de minerais (SPOKAS et al., 2015). Os valores de  $\chi_{fd}$  acima de 14% não decorrem de erros, mas provavelmente do grande teor de partículas SP (SILVA; SOUZA JUNIOR; COSTA, 2010), além da presença de fogo e com isso, esses solos apresentaram os maiores valores de SMbf. De acordo com Dearing (1999), amostras com  $\chi_{fd} < 2\%$  indicam a presença predominante de minerais de grãos de multidomínios. Solos com valores de  $\chi_{fd}$  intermediários, entre 2 e 10 %, correspondem a uma mistura de partículas de multidomínios e domínios simples; valores de  $\chi_{fd}$  entre 10 e 14 % indicam predominância de partículas superparamagnéticas (SILVA; SOUZA JUNIOR; COSTA, 2010).

Os atributos apresentaram coeficiente de variação (CV) baixo, médio e alto segundo a classificação de Warrick e Nielsen (1980) (Tabela 3). Dentre os atributos estudados o  $\text{FCO}_2$  e  $\chi_{fd}$  com alto CV (31,79 e 53,22% respectivamente), é um indicativo de alta variabilidade, o que pode influenciar nos métodos ou o número de amostras para determinação da variabilidade destes atributos. Esses valores de CV podem ser considerados um primeiro indicativo da variabilidade espacial destes atributos estudados. Por outro lado, os valores de T °C, SB e V% apresentaram CV baixo (<12%), enquanto o Us, ECOT, COT, CTC e SMbf apresentaram médio CV.

A SMbf e  $\chi_{fd}$  apresentaram médio e alto valor de CV respectivamente (Tabela 3), seguindo comportamento semelhante aos atributos dos solos, o que reflete a grande sensibilidade da SM aos processos de formação do solo que variam continuamente na paisagem. Segundo Mathé et al. (2006) a SM pode ser utilizada como micro indicador das condições do solo. Com o CV pode-se comparar a variação entre amostras de variáveis com unidades diferentes, porém não permite analisar a variabilidade espacial dos atributos do solo nem seu padrão espacial (WARRICK; NIELSEN, 1980). Para isso, a análise geoestatística mostra que os atributos apresentaram variabilidade espacial, sendo expresso pelo ajuste dos semivariogramas (Figura 3).

O modelo esférico ajustou-se a  $\chi_{fd}$  e a quase todos os atributos, com exceção da SMbf e do FeOAA que se ajustou ao modelo exponencial. Apenas a

umidade do solo não foi observada dependência espacial, apresentando efeito pepita puro. Na pesquisa de Leal et al. (2015), os autores utilizaram a SM para caracterizar os potenciais de emissões de CO<sub>2</sub> em áreas agrícolas e verificaram ajustes de modelos esféricos para FCO<sub>2</sub> e SMbf da areia e argila. Estes ajustes mostram a relação espacial entre a SM e os atributos indicando que a SM pode ser utilizada como um método alternativo para estimar os teores e/ou a variabilidade espacial de atributos do solo (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000). A predominância de ajustes ao modelo esférico aos atributos culminou no ajuste do modelo esférico do semivariograma escalonado (Figura 2) que melhor definiram o efeito pepita, com os maiores valores de coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) e GDE.



**Figura 2.** Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos do solo em área com Terra Preta Arqueológica no Município de Manicoré, Amazonas. [modelo (efeito pepita - patamar - GDE - R<sup>2</sup> - alcance - resíduo)]. Esf. - Esférico; GDE - grau d de dependência espacial; R<sup>2</sup> - coeficiente de determinação

Avaliando o alcance do semivariograma escalonado, é possível observar o espaçamento estabelecido na malha amostral (Figura 2) foi suficiente para caracterizar a variabilidade espacial, com valores de alcance superiores a 10 m. Estes valores fornecem informações a respeito da heterogeneidade da distribuição espacial em relação às propriedades estudadas (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). É possível identificar que o alcance do semivariogramas ajustados a SMbf e a  $\chi_{df}$  apresentaram valores próximos aos demais atributos estudados. Esta relação

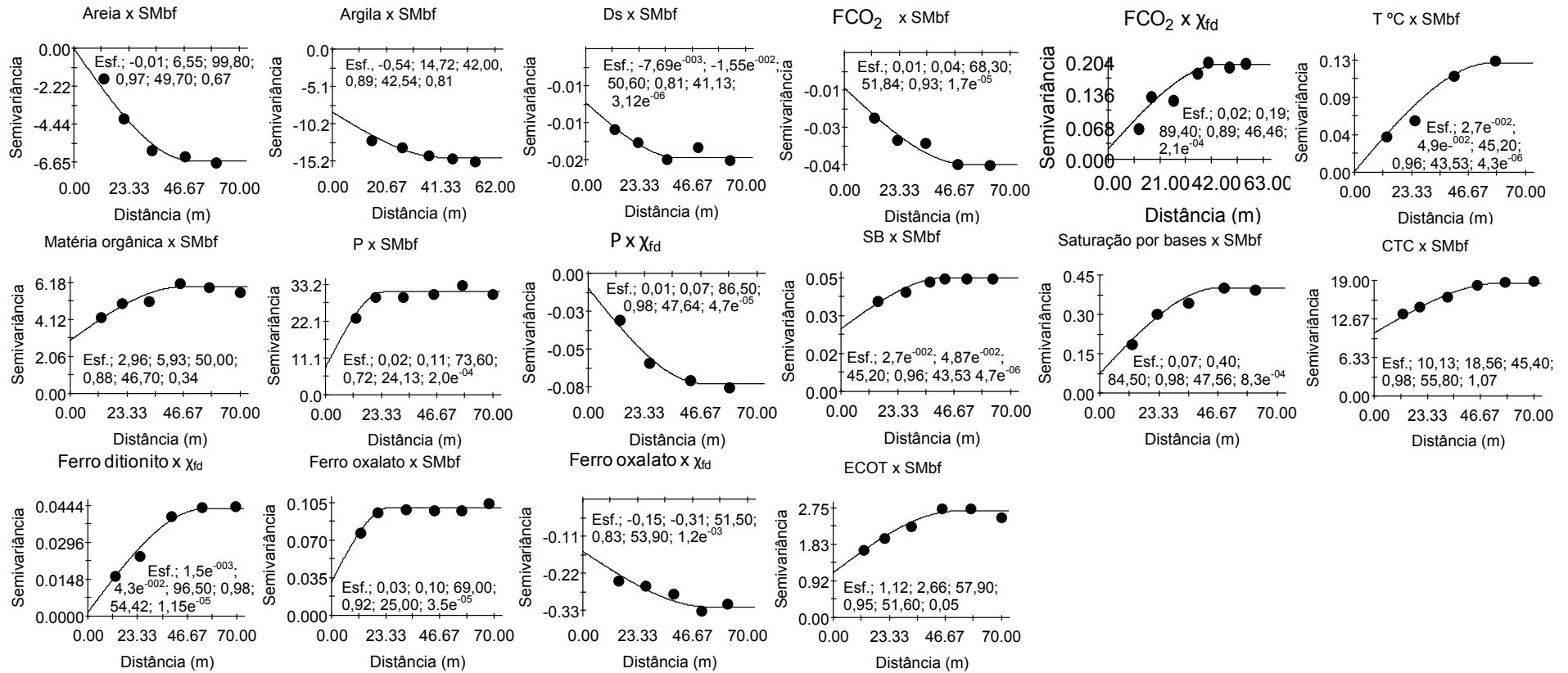
indica que a SM pode ser utilizada como indicador de variabilidade de atributos agrícolas e ambientais.

### **Correlação espacial e mapas de variabilidade**

A relação espacial da SM (SMbf e  $\chi_{fd}$ ) com os atributos agrícolas (areia, argila, Ds, pH, P disponível, MO, ECOT, SB, CTC, V%), formas de ferro (FeOAA e FeDBC) e ambientais (FCO<sub>2</sub> Us e T °C), foi validada com os modelos de semivariogramas cruzados (Figura 3). Para confirmar das correlações espaciais entre os atributos, foi realizada a correlação linear de Pearson (Figura 4). Esta correlação espacial foi confirmada, com a construção dos mapas espaciais para todos os atributos individualmente (Figura 5). A SM também está sendo utilizada na avaliação dos atributos do solo como foi observado nos estudos de Siqueira, Marques Junior e Pereira (2010), concluindo que a SM é um bom preditor de atributos relacionados com a composição e a mineralogia dos Argissolos com baixo teor de ferro.

As correlações espaciais positivas encontradas foram: FCO<sub>2</sub> e  $\chi_{fd}$ , ECOT e SMbf, MO e SMbf, P disponível e SMbf, T °C e SMbf, SB e SMbf, V% e SMbf, CTC e SMbf, Fed e  $\chi_{fd}$ , Feo e SMbf. As correlações espaciais negativas foram: argila e SMbf, areia e SMbf, FCO<sub>2</sub> e SMbf, Ds e SMbf, P disponível e  $\chi_{fd}$ , FeOAA e  $\chi_{fd}$ . Nos semivariogramas cruzados apresentados as correlações espaciais que se mostraram indefinidas foram: argila e  $\chi_{fd}$ , areia e  $\chi_{fd}$ , Us e SMbf, Us e  $\chi_{fd}$ , T °C e  $\chi_{fd}$ , Ds e  $\chi_{fd}$ , ECOT e  $\chi_{fd}$ , MO e  $\chi_{fd}$ , pH e  $\chi_{fd}$ , pH e SMbf, FeDBC e SMbf. Apesar de não apresentar correlação espacial, houve correlação linear positiva entre a argila e  $\chi_{fd}$ , Ds e  $\chi_{fd}$ , FeDBC e SMbf (Figura 4).

Entre as correlações espaciais, é possível observar que a SMbf diminui com o aumento da argila, areia e Ds (Figura 3 e 4). Uma possível explicação para este resultado pode estar relacionada a alta variabilidade da areia e argila (Tabela 2), em decorrência da presença de fragmentos líticos e cerâmicos que influenciam nos valores da fração textural, conforme relatado por Campos et al. (2011). Por outro lado, a presença de minerais magnéticos nos fragmentos cerâmicos podem explicar a correlação negativa entre a SMbf com argila e areia. Alguns trabalhos identificaram maghemita em fragmentos de cerâmica (COSTA et al., 2004; SERGIO et al., 2006).



**Figura 3.** Semivariogramas cruzados da SMbf e  $\chi_{fd}$  versus atributos agrícolas e ambiental do solo na terra preta arqueológica. (modelo;

$C_0$ ;  $C_0+C_1$ ; GDE;  $R^2$ ; a; Res); Esf. = Esférico;  $C_0$ = efeito pepita;  $C_0+C_1$ = patamar; GDE = grau de dependência espacial;  $R^2$  = Coeficiente de determinação; a = alcance; Res. = resíduo; EPP= efeito pepita puro; Ferro ditionito = FeDBC; Ferro oxalato = FeOAA.

A correlação espacial negativa entre a Ds com a SMbf está relacionada a correlação negativa entre a areia e a SMbf. A Ds é maior com o aumento do teor de areia o que ocasiona menores valores de SM no presente trabalho. Segundo Silva et al. (2011), solos com menores teores de argila apresentam maior valor de densidade do solo devido ao maior peso específico das partículas de quartzo que compõe a fração areia. Apesar dos valores das frações granulométricas das TPAs serem influenciados pelos fragmentos de cerâmicas (CAMPOS et al., 2011) e pela presença do fogo e presença de material orgânico (TEIXEIRA et al., 2009), esta também contribui para os valores de Ds das TPAs, além dos altos valores de MO e COT que contriu para a baixa Ds nas TPAs.

Houve correlação espacial positiva entre FeDBC e  $\chi_{fd}$  (Figura 3) e correlação linear positiva entre FeDBC e SMbf (Figura 4). O FeDBC expressa a presença de minerais mais cristalizados, preferencialmente hematita (antiferrimagnética), maghemita e ferrihidrita ferrimagnética (SCHWERTMANN et al., 1982; INDA JUNIOR, 2002). A presença de maghemita na fração argila das TPAs tem sua gênese creditada à queima de resíduos orgânicos na presença de outros óxidos (Gt e Hm) (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989), justificando a correlação espacial entre o FeDBC e  $\chi_{fd}$ , e a correlação linear positiva entre o FeDBC e SMbf, uma vez que a maghemita e ferrihidrita ferrimagnética apresentam magnetização natural.

A correlação espacial positiva entre FeDBC e  $\chi_{fd}$  (Figura 3) pode ser explicada pelos elevados valores de  $\chi_{fd}$  (Tabela 2), indicando que para essa escala do estudo, prevalece minerais superparamagnético (SP), o que também pode justificar a correlação linear positiva entre FeDBC e SMbf. Não houve correlação linear entre FeDBC e  $\chi_{fd}$  e correlação espacial entre FeDBC e SMbf (Figura 4).

Encontrou-se correlação positiva entre o FeOAA e SMbf (Figura 3) e correlação espacial e linear negativa entre FeOAA e  $\chi_{fd}$ . Isso pode ser explicado, uma vez que as leituras de FeOAA expressa indiretamente a quantidade de minerais menos cristalizados, os quais são muitas vezes formados na solução do solo, especialmente goethita e ferrihidrita não magnética (antiferrimagnéticas) (SCHWERTMANN, 1964; MCKEAGUE; DAY, 1966; BARRÓN; TORRENT, 2013). Apesar da Hm e Gt serem antiferrimagnéticas, são covariativas de minerais ferrimagnéticos como maghemita e ferrihidrita ferrimagnética, fazendo parte das vias de transformação dos óxidos de ferro nos solos (DUNSHENG et al., 2007;

TORRENT; LIU; BARRÓN, 2010), sendo uma possível explicação dos altos valores de correlação ( $r = 0,9254$ ) entre a SMbf e FeOAA (Figura 4).

Ocorreram correlações espaciais e lineares positivas entre  $\text{FCO}_2$  e  $\chi_{fd}$ , temperatura e SMbf,  $T$  °C e  $\chi_{fd}$ , ECOT e SMbf, MO e SMbf, P disponível e SMbf, SB e SMbf, V% e SMbf, CTC e SMbf (Figuras 3 e 4), as quais podem ser justificadas em razão da forte relação entre a MO e estoque de carbono e os demais atributos ( $\text{FCO}_2$ , ECOT, P, V% e CTC), uma vez que a MO e ECOT apresentaram correlação espacial positiva com a SMbf (Figura 3). Canellas et al. (2003), trabalhando com solos sob diferentes manejos, encontraram correlação entre CTC e o teor de MO. A contribuição da MO para a CTC dos solos foi estimada entre 56 e 82% da CTC de solos sob condições tropicais (RAIJ, 2011), o que favorece a retenção de cátions e diminui as perdas por lixiviação (RANGEL; SILVA, 2007; CARNEIRO et al., 2009).

Houve correlação espacial negativa entre SMbf e  $\text{FCO}_2$  (Figura 3). A dependência espacial do  $\text{FCO}_2$  e SM podem estar associadas à porosidade e  $D_s$ , que são dependentes de conteúdos areia e argila. Valores elevados de porosidade total e baixos valores de  $D_s$  promovem aumento na capacidade de difusão de gás em todo o solo e, conseqüentemente, aumenta a  $\text{FCO}_2$ .

As variações espaciais do  $\text{FCO}_2$  são controladas principalmente por propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, tais como  $D_s$  (SAIZ et al., 2006), textura (DILUSTRO et al., 2005), teor de matéria orgânica (SØE; BUCHMANN, 2005), estoque de carbono (PANOSSO et al., 2011; SCHARLEMANN et al., 2014), biomassa microbiana (SØE; BUCHMANN, 2005), pH (RETH et al., 2005), capacidade de troca catiônica e mineralogia do solo (LA SCALA et al., 2000). Em seu trabalho, La Scala et al. (2000) verificaram modelos de emissão similares aos ajustados para o teor de carbono orgânico e capacidade de troca catiônica do solo em Latossolo desprovido de vegetação. Isso demonstra a influência do teor de carbono do solo na  $\text{FCO}_2$ , conforme encontrado no trabalho de Schwendenmann et al., (2003) ao qual observaram além da influência do teor de carbono do solo na  $\text{FCO}_2$ , relação espacial entre a  $\text{FCO}_2$  e teores de fósforo.

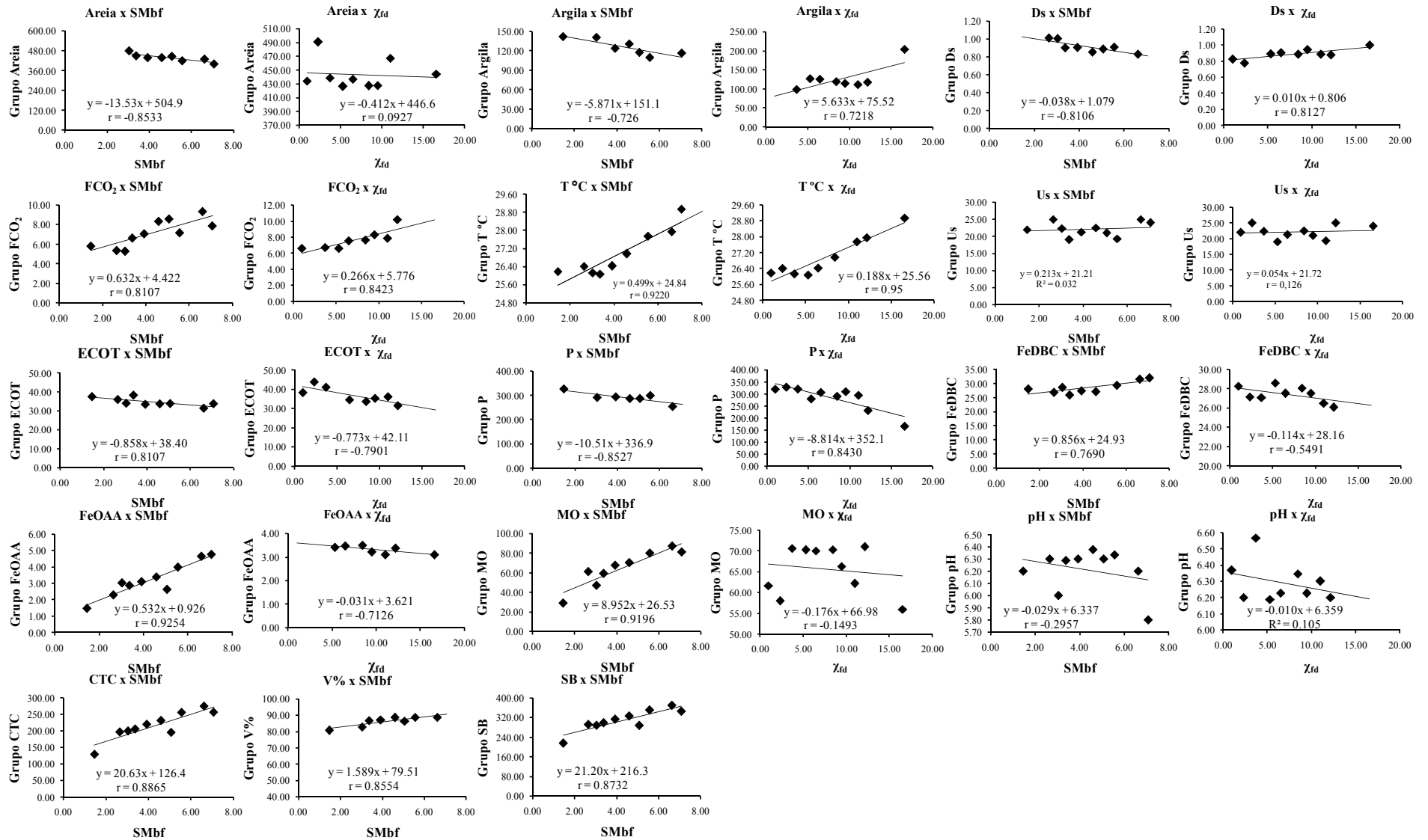


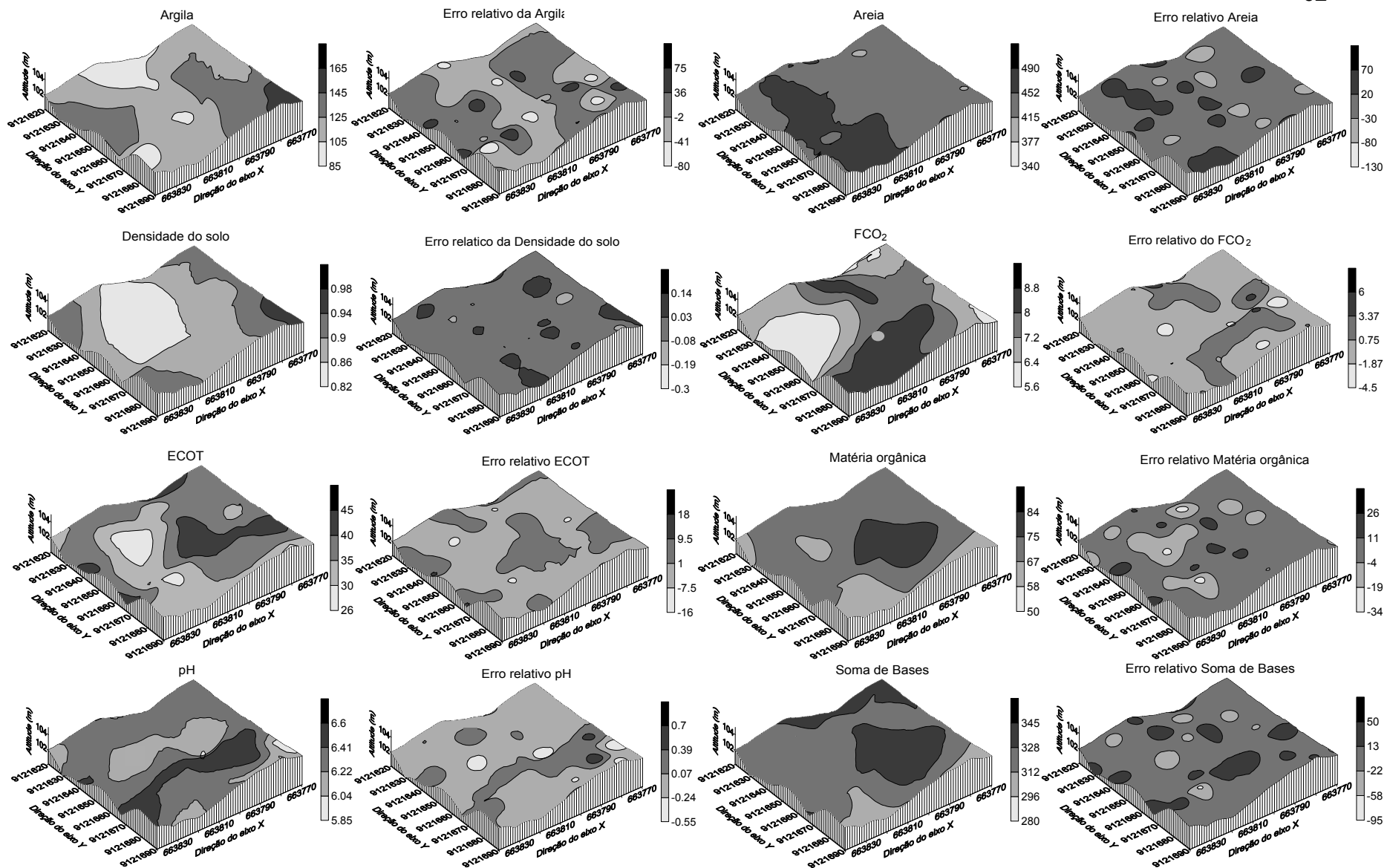
Figura 4. Correlação entre a SMbf e  $\chi_{fd}$  com os atributos agrícolas e ambiental do solo em área de terra preta arqueológica.

A SM apresentou relação com a variabilidade do P disponível, com correlação espacial positiva entre a SMbf e P disponível e correlação espacial negativa entre  $\chi_{fd}$  e P disponível (Figura 3). No entanto, houve correlação linear negativa entre estes atributos (Figura 4). Uma possível explicação para estes resultados deve-se a correlação negativa entre a textura e SM. Uma vez que os principais minerais responsáveis pela adsorção de P também são encontrados na fração argila, a correlação negativa entre SM e P disponível já era esperada. Neste caso, não havendo adsorção de P pelos minerais de argila maior será a disponibilidade de P no solo, conforme Peluco et al. (2013) que constataram correlação significativa da SM com os teores de P disponível e P adsorvido.

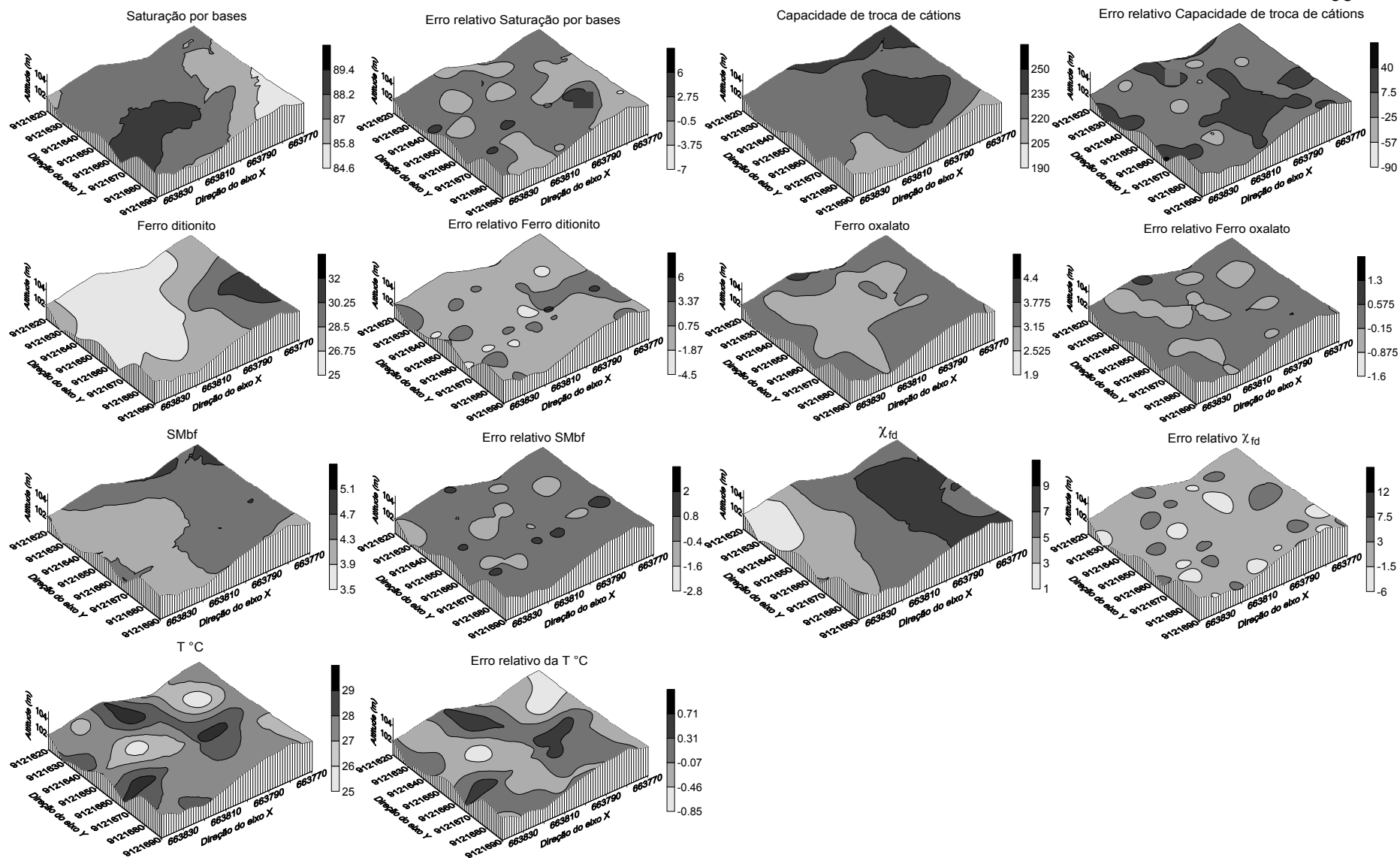
Os atributos que apresentaram dependência espacial, os parâmetros dos semivariogramas ajustados foram utilizados para estimar valores em locais não amostrados por meio da krigagem ordinária (Figura 5). Os ajustes de semivariogramas cruzados e os mapas de krigagem demonstram que houve correlação da SM e  $\chi_{fd}$  com quase todos os atributos agrícolas e ambientais.

Nos mapas de distribuição espacial observa-se que houve grande similaridade na variabilidade espacial entre os mapas da SMbf e  $\chi_{fd}$  com os atributos argila, areia, Ds, pH, MO, FCO<sub>2</sub>, T °C, FeOAA, FeDBC, CTC, V%, SB, apresentando correlação espacial. Nota-se que onde ocorrem os maiores valores de  $\chi_{fd}$ , também há os maiores valores de FCO<sub>2</sub>, FeDBC, Ds e argila (Figura 5). Já para a SMbf, os maiores valores confrontam com os maiores valores de ECOT, MO, SB, V%, CTC e FeOAA, confirmando as correlações encontradas nas Figuras 3 e 4. Por outro lado, menores valores de  $\chi_{fd}$ , confrontam com os menores valores de FeOAA, enquanto que os menores valores de SMbf estão relacionados aos menores valores de argila, areia, FCO<sub>2</sub> e Ds.

Verificou-se que após os ajustes dos modelos matemáticos (semivariograma) e construção dos mapas de variabilidade, a SMbf variou de 3,5 a 5,1 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> (Figura 5). A Ds (variando de 0,82 a 0,98 kg dm<sup>-3</sup>) apresenta correlação espacial com o FCO<sub>2</sub>, no qual, os menores valores de Ds coincidem com os maiores valores de FCO<sub>2</sub> (variação de 5,6 a 8,8 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). Uma vez que a Ds está intimamente relacionada à textura do solo, MO e ECOT (Figura 3), alto teor MO (variação de 50 a 84 g dm<sup>-3</sup>) levaram aos menores valores de Ds encontrada nos solos de TPA; segundo Kern e Kämpf (1989), isso favorece a redução da compactação decorrente do pisoteio de povos indígenas que habitavam esses locais.



Continua...



**Figura 4.** Mapas de variabilidade espacial e erro relativo dos atributos físicos, químicos, magnéticos e formas de ferro do solo em área de terra preta arqueológica.

É possível observar relação entre os teores de FeOAA e FeDBC com  $\chi_{fd}$ . Neste mesmo sentido, a  $\chi_{fd}$  também apresenta relação com o FCO<sub>2</sub> e os atributos MO, P disponível, CTC e V%. Essa justificativa deve-se aos atributos estudados estarem intimamente relacionados entre si, conforme estudado por Dilustro et al. (2005), Sørensen e Buchmann (2005), Saiz et al. (2006), Panosso et al. (2011) e La Scala et al. (2000), justificando as relações espaciais encontradas neste trabalho.

As distribuições espaciais da  $\chi_{fd}$  e SM com areia e argila não apresentaram padrões de variabilidade similares demonstrando que a textura das TPAs não é um parâmetro indicado para estimar ou explicar as variações encontradas nos demais atributos agrícolas e ambientais. Este comportamento não se repete em solos não antropogênicos, uma vez que durante a pedogênese, por intemperismo físico e oxidação, a magnetita transforma-se em maghemita, sendo comum sua ocorrência na fração argila dos solos (RESENDE et al., 1988; FONTES; WEED, 1991), justificando a relação positiva entre a SM e argila em solos não antropogênicos.

No trabalho de Souza Junior et al. (2010), estes encontraram correlação positiva entre argila e SM<sub>bf</sub> ( $r= 0,99$ ) e relatam que essa correlação é devido a presença de magnetita e maghemita nas frações texturais dos solos não antropogênicos. Fontes et al. (2000) mencionaram que o comportamento magnético é mais evidente em solos cuja fração argila é maior. Isso ocorre porque, na fração areia, a magnetita, é oxidada diretamente em hematita, enquanto na fração argila a magnetita é oxidada em maghemita (SINGER et al., 1995).

A presença de fragmentos cerâmicos nas TPAs e o uso do fogo (hipótese antropogênica) são as hipóteses mais aceitas para explicar as relações da SM e os atributos agrícolas e ambientais nas TPAs. A presença de fogo e materiais orgânicos nas TPAs pode ter favorecido a formação e/ou concentração de maiores teores de minerais magnéticos, como a maghemita e ferrihidrita ferrimagnética. Neste sentido, vale salientar, que o FCO<sub>2</sub> pode estar relacionado com a SM dos solos, conforme encontrado no trabalho de Leal et al. (2015). Por outro lado, a matéria orgânica que pode influenciar nos valores da FCO<sub>2</sub>, está diretamente ligada à formação de minerais magnéticos que interferem diretamente nos valores de SM. Logo, compreender a SM das TPAs pode auxiliar em ações mais sustentáveis ou até mesmo gerar indicadores pra produção industrial de TPA.

Desta forma, o presente trabalho apresenta novos estímulos e sinaliza a necessidade de estudos que investiguem a formação das TPAs. Nestes futuros

estudos, devem-se levar em consideração a influência das ações humanas como o uso do fogo, a composição florística da região, o clima, a formação, origem e presença de fragmentos de cerâmica nestes solos.

### 3.4 CONCLUSÕES

A suscetibilidade magnética não apresenta potencial para determinar a variabilidade espacial da areia e argila em terra preta arqueológica, devido a presença de fragmentos cerâmicos nestes solos.

Os valores de suscetibilidade magnética podem estar associados com a presença de maghemita encontradas nos solos e nos fragmentos cerâmicos presentes em decorrência da ação antrópica na terra preta arqueológica.

A suscetibilidade magnética apresenta padrão de variabilidade espacial similar ao fluxo de CO<sub>2</sub> e com os atributos agrícolas. As terras pretas arqueológicas apresentam grande potencial agrícola e ambiental, em razão da sua alta fertilidade e capacidade de mitigação da emissão de CO<sub>2</sub>.

Locais com maior suscetibilidade magnética (4,7 a 5,1 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>) apresentam 1,2 vezes mais CTC e emitiram 1,4 vezes menos CO<sub>2</sub> em comparação às áreas com menores valores magnéticos (3,5 a 3,9 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>).

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A suscetibilidade magnética foi maior nos horizontes antrópicos, nos perfis com Terra Preta de Arqueológica, diminuindo em profundidade. Este resultado demonstra a ação do uso do fogo na neoformação de minerais com maior expressão magnética.

Apesar dos baixos valores de suscetibilidade magnética nas cinzas das plantas, é possível que há influência litogenética nos valores de SM das TPAs. Estes valores demonstram que o processo cumulativo de queima de plantas nas TPAs por anos e até mesmo séculos, podem contribuir na formação de minerais, e consequentemente na SM destes solos.

O presente trabalho aponta a necessidade de ajustes na metodologia de avaliação da suscetibilidade magnética e determinação dos minerais nas plantas, uma vez que foi encontrada suscetibilidade magnética nas cinzas das plantas. Os aparelhos de avaliação da suscetibilidade magnética usados neste trabalho são ajustados para avaliação de minerais no solo e não em plantas.

### 3.6 REFERÊNCIAS

- AQUINO, R. E. Características de atributos do solo em ambientes da região sul do Amazonas. 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2014.
- AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, I. A.; TEIXEIRA, D. B.; CUNHA, J. M. Use of scaled semivariograms in sample planning of soil physical attributes in Southern Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n.1, p. 21-30, 2015.
- AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; Campos, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; BAHIA, A. S. R. S.; SANTOS, L. A. C. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. **Geoderma**, Amsterdam, v. 262, n.1, p. 35-44, 2016.
- BARRÓN, V., TORRENT, J. Iron, manganese and aluminium oxides and oxyhydroxides. In: NIETO, F; LIVI, K.J.T. (Ed.). **Minerals at the Nanoscale**. Twickenham: EMU Notes in Mineralogy, 2013. cap.9, p.297–336.
- BARTINGTON. **Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System**. Bartington Instruments. 2013, 71p. Disponível em na internet: <<http://www.bartington.com/Literaturepdf/Operation20Manuals/om040820MS2.pdf>>; Acessado em: 24/01/2016.
- BRASIL. **Ministério das Minas e Energia**. Projeto Radambrasil, folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro, 1978. 561 p.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, L. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física do solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 96p. (Boletim Técnico, 106).
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E.; Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CAMPOS, M. C. C.; ALHO, L. C.; SILVA, D. A. P.; SILVA, M. D. R.; CUNHA, J. M.; SILVA, D. M. P. Distribuição espacial do efluxo de CO<sub>2</sub> em área de terra preta arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 11, n.4, p. 788-798, 2016.
- CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO M. R.; SOUZA, R. V. C. C.; ALMEIDA, M. C. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p.598-609, 2011.
- CAMPOS, M. C. C.; SANTOS, L. A. C.; AQUINO, R. E. ; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. M. P.; MARQUES JR, J.; FRANCA, A. B. C. Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n.4, p. 825-836, 2013.

- CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.5, p.935-944, 2003.
- CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W.R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.2, 147-157, 2009.
- CEDDIA, M. B.; VIEIRA, S. R.; VILLELA, A. L. O.; MOTA, L. S.; ANJOS, L. H. C.; CARVALHO, D. F. Topography and spatial variability of soil physical properties, **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.66, n.3, p. 338-352, 2009.
- COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M.; RHOTON, F. E.; TRAINA, S. J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays and Clay Minerals**, New York, v.4, n.4, p.466-473, 1999.
- COSTA, M.L.; KERN, D.C.; PINTO, A.H.E.; SOUZA, J.R.T. The ceramic artifacts in archaeological black earth (terra preta) from Lower Amazon region, Brazil: chemistry and geochemical evolution. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 34, n. 3, p. 375-386, 2004.
- CPRM. Centro de Pesquisa de Recursos Minerais. **Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens**. (Relatório Técnico) Manaus, 2001. 93p.
- CUNHA, T.J.F.; MADARI, B.E.; BENITES, V.M.; CANELLAS, L.P.; NOVOTNY, E.H.; MOUTTA, R.O.; TROMPOWSKY, P.M.; SANTOS, G.A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com Horizonte A antrópico da Amazônia (Terra Preta). **Acta Amazonica**, Manaus, v.37, n.1, p.91-98, 2007.
- DEARING, J. A. **Environmental magnetic susceptibility**. Using the Bartington MS2 system. England: British Library, 1994, 104 p.
- DEARING, J. **Environmental magnetic susceptibility**: Using the Bartington MS2 System. 2.ed. Kenilworth, Chi Publishing, 1999. 54p.
- DERENNE, S.; LARGEAU, C. A review of some important families of refractory macromolecules: Composition, origin, and fate in soils and sediments. **Soil Science**, Oxford, v.166, n.11, p.883-884, 2001.
- DEUTSCH, C.V.; JOURNAL, A.G. **GSLIB: geostatistical software library and user's guide**. 2nd ed. New York: Oxford University, 1998. 369p.
- DILUSTRO, J. J.; COLLINS, B.; DUNCAN, L.; CRAWFORD, C. Moisture and soil texture effects on soil CO<sub>2</sub> efflux components in southeastern mixed pine forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 204, n. 1, p. 87-97, 2005.
- DUNSHENG, X.; MING, J.; XIUMING, L.; FAHU, C.; JIANYING, M.; HUI, Z.; XUNMING, W.; HAITAO, W. A preliminary study on the magnetic signatures of modern soil in Central Asia. **Frontiers Earth Science**, China, v.1, n.3, p.275-283, 2007.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

- FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**, Amsterdam, v.96, n.1-2, 81-99, 2000.
- FONTES, M.P.F.; WEED, S.B. Iron oxides in selected Brazilian Oxisols: I. mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55, n.4, p.1143-1149, 1991.
- GERMAN, L. A. Historical contingencies in the coevolution of environment and livelihood: contributions to the debate on Amazonian Black Earth. **Geoderma**, Amsterdam, v.111, n.3-4, p.307–331, 2003.
- 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**, London, v.362, n.1478, p.187–196, 2007.
- GOLDEN SOFTWARE INC. **SURFER for Windows: release 7.0**: contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers, user's guide. New York. , 1999.
- GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.64, n.6, p.2174-2180, 2000.
- GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um Latossolo Roxo**. 1993. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade de Campinas, Campinas, 1993.
- INDA JUNIOR, A. V. **Caracterização de goethita e hematita em solos poligenéticos**. 2002. 126f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.
- KERN, D.C. KÄMPF, N. Antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná, Pará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, n.3, 219-225, 1989.
- LA SCALA, N.; MARQUES JÚNIOR, J. ; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO<sub>2</sub> emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1459-1462, 2000.
- LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, Malden, v.60, n.2, p.158–169, 2009.
- LEAL, F. T.; FRANÇA, A. B. C.; SIQUEIRA, D. S. ; TEIXEIRA, B. ; MARQUES JÚNIOR, J.; SCALA JÚNIOR, N. Characterization of potential CO<sub>2</sub> emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, n.6, p. 535-539, 2015.
- LEHMANN, J.; KERN, D.C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. (Eds.), **Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management**. Kluwer Academic Publishers, Dodrecht, 2003. 523p.
- LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E.R.; MELLO, J. W. V. GILKES, R. J.; KER, J. Pedogenesis and pre-Colombian land use of "Terra Preta Anthrosols" ("Indian Black Earth") of Western Amazonia. **Geoderma**, Amsterdam, v.110, n.1, p.1–17, 2002.

LOURENÇO, A.M.; SEQUEIRA, E.; SANT'OVAIA, H.; GOMES, C.R. Magnetic, geochemical and pedological characterisation of soil profiles from different environments and geological backgrounds near Coimbra, Portugal. **Geoderma**, Amsterdam, v. 213, n. 1, p. 408–418, 2014.

MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. B.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, Amsterdam, v. 219-220, n.1, p. 63-71, 2014.

MATHÉ, V.; LÉVÊQUE, F.; MATHÉ, P. E.; CHEVALLIER, C.; PONS, Y. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v.58, n. 3, p. 202–217, 2006.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Littleton, v. 58, n.8, p. 1246-1266, 1963.

McKEAGUE, J.A.; DAY, J.H. Dithionite and oxalate-extractable Fe e Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.46, n.1, p.13-22, 1966.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removed from soils and clays by dithionitecitrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, New York, v. 7, n. 1, p. 1317-327, 1960.

MULLINS, C. E. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science- a review. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 28, n.2, p.223–246, 1977.

OHASHI, M.; GYOKUSEN, K. Temporal change in spatial variability of soil respiration on a slope of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 39, p. 1130-1138, 2007.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J. ; AQUINO, R. E. ; TEIXEIRA, D. B. ; SILVA, D. M. P. Use of scaled semivariograms in sample planning of soil chemical attributes in southern Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n.1, p. 31-39, 2015c.

OLIVEIRA, I. A; CAMPOS, M. C. C.; FREITAS, L.; SOARES, M. D. R. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Acta Amazonica**, Manaus, v. 45, n.1, p. 1-12, 2015a.

OLIVEIRA, I. A; MARQUES JÚNIOR, J. ; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; SIQUEIRA, D. S.; CUNHA, J. M. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos do solo em Argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n.3, p. 668-681, 2015b.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; MILORI, D. M. B. P.; FERRAUDO, A. S.; BARBIERI, D. M.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Soil CO<sub>2</sub> emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p.190–196, 2011.

PELUCO, R. G.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. B. ADAME, C. R.; CORTEZ, L. A. Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.6, p.661-672, 2013.

- RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.
- RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.80, p.1609-1623, 2007.
- RESENDE, M.; SANTANA, D.P.; FRANZMEIER, D.P. & COEY, J.M.D. Magnetic properties of Brazilian Oxisols. In: **International Soil Classification Workshop**, Rio de Janeiro, 1988. Proceedings. Rio de Janeiro, 1988. p.78-108.
- RETH, S.; MARKUS, R.; FALGE, E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO<sub>2</sub> efflux – A modified model. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 268, n. 1-2, p. 21-33, 2005.
- ROBERTSON, G. P. **GS<sup>+</sup> geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998, 152 p.
- SAIZ, G.; GREEN, C.; BUTTERBACH-BAHL, K.; KIESE, R.; AVITABILE, V.; FARRELL, E.P. Seasonal and spatial variability of soil respiration in four Sitka spruce stands. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.287, p.161-176, 2006.
- SANTANA, D. P. **Soil formation in a topossequence of Oxisols from Patos de Minas Region, Minas State, Brazil**. 1984. 129f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Purdue University, West Lafayette. 1984.
- SCHARLEMANN, J.P.W.; TANNER, E.V.J.; HIEDERERD, R.; KAPOS, V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. **Carbon Management**, v. 5, n.1, p. 81-91, 2014.
- SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit sauer Ammoniumoxalat-Lösung. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, v.105, 194–202, 1964.
- SCHWERTMANN, U.; CORNELL, R.M. **Iron oxides in laboratory**. New York: Cambridge, VCH, 1991. 137p.
- SCHWERTMANN, U.; KLANT, E.; KÄMPF, N.; SCHNEIDER, P. Observações pedogenéticas em solos do Brasil. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.8, n.2, p.39-43, 1982.
- SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in Soil Environments**. 2.ed. Madison: SSSA, 1989. p. 379–438.
- SERGIO, C.S.; SANTANA, G.P.; COSTA, G.M.; HORBE, A.M.H. Identification and characterization of maghemite in ceramic artifacts and archaeological black earth of Amazon region. **Soil Science**, Philadelphia, v. 171, n. 1, p. 59-64, 2006.
- SILVA, A. R.; SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S. Suscetibilidade magnética do horizonte B de solos do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.2, p.329-337, 2010.
- SILVA, D. M. P.; CAMPOS, M. C. C.; FRANCISCON, U.; ALHO, L. C.; SANTOS, L. A. C.; PAULA NETO, P.; BERGAMIN, A. C.; SOUZA, Z. M. Spatial Variability of Soil Properties in Archeological Dark Earth Sites under Cacao Cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, s/n., p. 816-828, 2016.

- SILVA, F. W. R.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; MOTTA, M. B.; SANTANA, R. M. Caracterização química e mineralogia de solos antrópicos (Terras Pretas de Índio) na Amazônia central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n.3, p.673-681, 2011.
- SINGER, M. J.; BOWEN, L.H.; VEROSUB, K. L.; FINE, P.; TENPAS, J. Mössbauer spectroscopy evidence for citrate-bicarbonate-dithionite extraction of maghemite from soils. **Clays and Clay Minerals**, New York, v. 43, n.1, p.1-7, 1995.
- SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v.155, n.1, p.55–66, 2010.
- SKJEMSTAD, J.O; CLARKE, P.; TAYLON, J.A.; OADES, J.M.; MCCLURE, S.G. The chemistry 23 and nature of protected carbon in soil. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 34, n.2, p. 251-271, 1996.
- SMITH N. J. H. Anthrosols and human carrying capacity in Amazonian. **Annals of the Association of American Geographers**, Washington, v. 70, n.4, p. 553-566, 1980.
- SØE, A. R. B.; BUCHMANN, N. Spatial and temporal variations in soil respiration in relation to stand structure and soil parameters in an unmanaged beech forest. **Tree Physiology**, Oxford, v. 25, n. 11, p.1427–1436, 2005.
- SOMBROEK, W.; RUIVO, M. L.; FEARNSTIDE, P. M.; GLASER, N.; LEHMANN, J. Amazonian Dark Earths as carbon stores and sinks. In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W, I. **Amazonian Dark Earths. Origin, properties and management**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003. p.125-139.
- SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; VILAR, C. C.; HOEPERS, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 3, p. 513-519, 2010.
- SPOKAS, K.; MARQUES JUNIOR, J. ; LA SCALA, N.; NATER, E. ; SIQUEIRA, D.S. **Black Earths (Terra Preta): Observations of wider occurrence from residual fire**. In: Rattan Lal. (Eds.). *Encyclopedia of Soil Science, Second Edition -Two-Volume Set Encyclopedia of Soil Science, Second Edition*. 2. ed. North Andover, Massachusetts: Aries Systems Corporation, 2015, p. 1-4.
- STATISTICA. **Statistica 7.0**. EUA Software. Tucksas: StatSof. Baltimore, 250p. 2005.
- STEINBEISS, S.; GLEIXNER, G.; ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. **Soil Biology Biochemistry**, Oxford, v.41, n.6, p.1301-1310, 2009.
- TEDESCHI, V.; REY, A.; MANCA, G.; VALENTINI, R.; JARVIS, P. G.; BORGHETTI, M. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after coppicing. **Global Change Biology**, Oxford, v. 12, p. 110-121, 2006.
- TEIXEIRA, D. B.; BICALHO, E. S.; PANOSSO, A. R.; CERRI, C. E. P.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JÚNIOR, N. Spatial variability of soil CO<sub>2</sub> emission in a sugarcane area characterized by secondary information. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.70, n.3, p.195-203, 2013.

- TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C.; MACEDO, R. S.; NEVES JUNIOR, A. F.; MOREIRA, A.; BENITES, V. M.; STEINER, C. As propriedades físicas e hídricas dos Horizontes Antrópicos das Terras Pretas de Índio na Amazônia Central. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas.** Manaus: **Embrapa Amazônia Ocidental**, 2009. p. 242-250.
- TORRENT, J.; LIU, Q.S.; BARRÓN, V. Magnetic susceptibility changes in relation to pedogenesis in a Xeralf chronosequence in northwestern Spain. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.61, n.2, p.161–173. 2010.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, n.1, p.54-94, 1985.
- VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.1, p.175-180, 1994.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.) **Tópicos ciência do solo - Campinas**: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54. 2000.
- VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Oakland, v.51, n.3, p.1-75, 1983.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. p.319-344.
- YOEMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v.19, n.13, p.1467-1476, 1988.