

**UFRRJ**

**INSTITUTO DE AGRONOMIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**CIÊNCIA DO SOLO**

**DISSERTAÇÃO**

**Funções de Pedotransferência para Padronização de**

**Base de Dados, Critérios de Classificação**

**Taxonômica e Susceptibilidade Magnética em Terra**

**Preta de Índio**

**Fernanda Reis Cordeiro**

**2020**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA  
CIÊNCIA DO SOLO**

**FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA PADRONIZAÇÃO DE  
BASE DE DADOS, CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA  
E SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA EM TERRA PRETA DE ÍNDIO**

**FERNANDA REIS CORDEIRO**

*Sob a Orientação da Professora*  
**Lúcia Helena Cunha dos Anjos**

*e Coorientação do Pesquisador*  
**Ademir Fontana**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Área de Concentração em Pedologia e Física do Solo.

Seropédica, RJ  
Fevereiro de 2020

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada  
Com os dados fornecidos pelo(a) Autor(a)

C794f Cordeiro, Fernanda Reis, 1991-  
Funções de pedotransferência para padronização de base de dados, critérios de classificação taxonômica e susceptibilidade magnética em terra Preta de Índio / Fernanda Reis Cordeiro. – Seropédica, 2020.  
84 f. : il.

Orientadora: Lúcia Helena Cunha dos Anjos.

Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, 2020.

1. Padronização de dados. 2. Terra Preta de Índio. 3. Critérios de classificação de solos. 4. Susceptibilidade magnética. I. Anjos, Lúcia Helena Cunha dos, 1957-, orient. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. III. Título.

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

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

**FERNANDA REIS CORDEIRO**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, área de Concentração em Pedologia e Física do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 13/02/2020

---

Lúcia Helena Cunha dos Anjos. Ph.D. UFRRJ  
(Orientador)

---

Wenceslau Geraldes Teixeira. Ph.D. Embrapa Solos

---

Milton César Costa Campos. Dr. UFAM

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe que em todos os momentos da minha vida me incentivou e apoiou nos estudos e principalmente, por toda educação, paciência, companheirismo. Agradeço também aos puxões de orelha e limites, que me fizeram crescer e me tornar uma pessoa mais forte e preparada para os desafios da vida. Minha mãe é meu exemplo de força e garra.

Agradeço ao meu companheiro e melhor amigo, Fernando Vieira Cesário, por toda sua experiência, ensinamentos e paciência nessa minha jornada. Foram horas e mais horas me ensinando a dominar os pacotes do R, mostrando que minha escrita poderia melhorar e me auxiliando emocionalmente nessa jornada de pós-graduação. Fernando é o meu exemplo de pesquisador, cientista, doutor e orientador.

À minha instituição, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pela oportunidade de fazer um curso que me abriu portas para o mundo e as portas do meu ser, me fazendo pensar fora da caixa. Gratidão pelos respeitadores professores, amigos e xícaras de café. Aos aperfeiçoamentos de minhas habilidades, vasto conhecimento agrônomo, experiência e profissionalismo dos docentes. Foi uma honra estudar no Programa de Pós-graduação em Agronomia – Ciência do Solo, da UFRRJ, curso de excelência em Ciência do Solo do Brasil.

Agradecimento em especial à minha orientadora Lúcia Helena Cunha dos Anjos, que me apoiou e confiou no meu trabalho. Gratidão por me dar suporte sempre que necessário, me passando muito tranquilidade e segurança. A Lúcia é o meu maior exemplo de mulher forte, segura e determinada. É meu grande exemplo de cientista e da força da mulher para chegar onde ela quiser.

À Embrapa Solos pela oportunidade de trabalhar com os solos antrópicos e pela confiança no meu potencial como aluna de pós-graduação, no meu potencial como profissional e por todas as outras oportunidades que tive, como as viagens de campo, cursos extras, financiamentos para congressos, estrutura para o desenvolvimento da minha dissertação. Sinto muito orgulho de ter feito parte da história dessa instituição tão renomada e ter agregado conhecimento nas pesquisas.

Ao meu coorientador, Ademir Fontana, gratidão eterna por toda sua racionalidade, conhecimentos, além de toda sua paciência, incentivo e carinho com todos seus orientados para que se tornem excelentes pesquisadores. Sempre apoiando nos momentos bons, aconselhando nos momentos difíceis e nos motivando 24 horas por dia.

Ao pesquisador da Embrapa Solos, Wenceslau Gerales Teixeira, que confiou no meu trabalho, me apoiou e me auxiliou muito com toda sua expertise, dados, revistas, artigos, livros

e uma infinidade de materiais que nem coube no meu dropbox (risos). Sempre com muita paciência e serenidade, me trazia palavras confortantes nos momentos de angústia, e puxões de orelhas necessários nos momentos de revisão de texto. Aos pesquisadores da Embrapa Solos, Renato Rodrigues e Fabiano Balieiro, pelo apoio emocional, ensinamentos e amizade. Vocês são um grande exemplo de profissionais para mim, no qual me espelho e tenho tamanha admiração.

À minha querida amiga, Andressa Rosas, que sempre me apoiou e estendeu sua mão nos momentos que mais precisei de ajuda, me auxiliando e me mantendo motivada nessa caminhada intensa de pós-graduação, me passando todas as dicas para ter uma jornada melhor. Às minhas amigas, Ana Carolina B. Do Canto, Raphaela Fonseca, Fernanda Granja, Julia Graziela e Natassia Armancolo por muitos cafés, lanchinhos, boas risadas e muitas trocas de experiências nesses nossos momentos de pós-graduação. Vocês são mulheres incríveis! Aos meus amigos da UFRRJ, muito obrigada pelo apoio, acolhimento e ajuda. Chegar de uma outra instituição não é fácil e vocês fizeram minha jornada ser mais leve e organizada.

*“Este aqui é o mês em que decidi largar tudo que não influenciasse profundamente os meus sonhos. O dia em que me recusei a ser vítima. Esta é a mesma semana em que dormi na grama. Na primavera torci o pescoço da insegurança. Deixei sua gentileza de lado. Derrubei o calendário. Aqui a semana em que dancei com tanta empolgação que meu coração aprendeu a flutuar de novo. O verão em que tirei todos os espelhos da parede. Eu não precisava mais me ver para me sentir vista. Tirei o peso do meu cabelo com o pente. Dobro os dias bons e ponho todos no bolso de trás da calça só por segurança. Acendo um fósforo. Queimo tudo que seja supérfluo. O calor do fogo aquece meus dedos do pé. Pego um copo de água morna para me limpar inteira para janeiro. Estou chegando. Mais forte e mais inteligente rumo ao novo.”*

**Rupi Kaur**

## RESUMO GERAL

CORDEIRO, Fernanda Reis. **Funções de pedotransferência para padronização de base de dados, critérios de classificação taxonômica e susceptibilidade magnética em Terra Preta de Índio**. 2020. 84f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

Na região Amazônica, solos conhecidos como Terra Preta de Índio (TPI) apresentam como características marcantes cores escuras e elevada fertilidade natural. Esses solos resultam da intervenção pré-histórica de culturas pré-Colombianas, que em sua ocupação adicionaram ao solo artefatos cerâmicos e líticos, restos de carvão, de alimentos e ossos. Ao longo dos anos, essas deposições levaram ao desenvolvimento de características diferenciadas em relação aos solos não antrópicos amazônicos, como os altos valores de pH (H<sub>2</sub>O), cálcio, magnésio, fósforo e estoques de carbono; conferindo elevada capacidade de troca de cátions e saturação de bases aos espessos horizontes A. Essas características somadas à alta estabilidade e reatividade da matéria orgânica induzem a elevada fertilidade das TPI, despertando o interesse de cientistas do solo para os estudos de atributos morfológicos, físicos e químicos. As TPI têm horizonte diagnóstico superficial definido como A antrópico pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, SANTOS et al., 2018). No sistema internacional de classificação de solos *World Reference Base for Soil Resource* (IUSS WORKING GROUP WRB, 2014) as TPI são conhecidas como *Amazonian Dark Earth* (ADE) e identificadas pelo *Pretic horizon*, como diagnóstico superficial. Porém, os critérios quantitativos atuais para o horizonte A antrópico do SiBCS e o *Pretic* do WRB, não permitiram classificar 50% dos perfis identificados como TPI em estudos na região amazônica e compilados para esse trabalho. Ainda, as unidades em que alguns atributos químicos do solo são expressos, nesses trabalhos, possuem inconsistências, devido à adoção de distintos métodos de laboratório para tomar a amostra. As diferentes unidades podem influenciar em decisões sobre limites de critérios quantitativos, principalmente para os teores de fósforo e cálcio mais magnésio, mas não foram encontrados na literatura fatores que permitissem a conversão dessas unidades. Logo, inicialmente, foram desenvolvidas funções de pedotransferência (PTF) para essa conversão e assim harmonizar dados das análises químicas, ajustando as unidades usadas nos trabalhos compilados. A PTF com maior precisão, isto é, com o menor RSE (0,092 g cm<sup>-3</sup>), foi a que utiliza o teor de areia total para prever a densidade da terra fina, essencial para a conversão dos dados. Posteriormente, os dados foram avaliados e propostos critérios taxonômicos quantitativos para os horizontes A antrópico do SiBCS e o *pretic horizon* do WRB. Com a reclassificação dos solos segundo os critérios propostos, 84% dos perfis foram incluídos como A antrópico (SiBCS) e também *Pretic horizon* no WRB, sendo que, com os novos critérios, 81% dos perfis passam a se enquadrar no grupo dos *Anthrosols*. Outro aspecto citado na literatura sobre as TPIs é sua elevada susceptibilidade magnética (SM), que está relacionada às alterações na estrutura do mineral do solo causadas pelo aquecimento quando do uso de fogo (queima, fogueiras) por ocupações humanas. A SM pode ser determinada com sensores proximais, resultando em outra forma de identificação de sítios de ocupação humana pré-histórica. Assim, em estudo preliminar no Campo Experimental de Pesquisa do Caldeirão, município de Iranduba (AM), foi avaliada a SM de amostras de camadas de solo identificadas como antrópicas e não antrópicas. A classificação das amostras seguiu o critério vigente do WRB para o *Pretic horizon*. Nas amostras antrópicas, os valores de SM foram maiores e houve correlação positiva e elevada entre a SM e teores de P e Zn, diferentemente das amostras não antrópicas.

**Palavras-chave:** Padronização de dados. Terra Preta de Índio. Critérios de classificação de solos. Susceptibilidade magnética.

## GENERAL ABSTRACT

CORDEIRO, Fernanda Reis. **Pedotransfer functions for database standardization, criteria for taxonomic classification and magnetic susceptibility of Amazonian Dark Earths**. 2020. 84p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

In the Amazon region, soils known as Amazonian Dark Earth (ADE) have as distinctive features the dark colors and high natural fertility. These soils result from the prehistoric intervention of pre-Columbian cultures, which in their occupation added to the soil ceramic and lithic artifacts, coal, food, and bone remains. Over the years, the deposition of these materials led to the development of characteristics different from the non-anthropogenic Amazonian soils, such as the high values of pH (H<sub>2</sub>O), calcium, magnesium, phosphorus, and carbon stock; resulting in high cation exchange capacity and base saturation of the thick A horizons. These characteristics, coupled with the high stability and reactivity of organic matter, induce the high fertility of ADE, which enticed the interest of scientists for morphological, physical, and chemical studies of these soils. The superficial diagnostic horizon of the ADEs is identified as *A antrópico* according to the Brazilian Soil Classification System (SiBCS, SANTOS et al., 2018). In the international system of soil classification, the World Reference Base for Soil Resource (IUSS WORKING GROUP WRB, 2014), the Amazonian Dark Earth (ADE) are identified by the pretic diagnostic surface horizon. However, the current quantitative criteria for the anthropic horizon (SiBCS) and the pretic horizon (WRB) failed to classify 50% of the profiles considered as ADE, which were compiled for this work from studies in the Amazon region. Another issue is that the profiles data in the evaluated works presented inconsistencies of some chemical attribute's units, due to the adoption of different laboratory methods when taking the sample. The different units may influence decisions about the limits of quantitative criteria, mainly for the phosphorus and calcium plus magnesium contents, but no conversion factors were found in the literature that allowed to adjust the difference in these units. Therefore, pedotransfer functions (PTFs) were developed to perform such conversions and to harmonize the chemical database, adjusting the different units used in the compiled studies. The PTF with higher precision, i.e., with the smallest RSE (0.092 g cm<sup>-3</sup>), was the one using total sand content to predict the density of the fine earth, essential for the conversion of the data. Subsequently, the data were evaluated and quantitative taxonomic criteria were proposed for the SiBCS Anthropic horizons and for the WRB pretic horizon. The soil profiles reclassification, according to the proposed criteria, shows that 84% of the profiles were included as *A antrópico* and pretic horizon, respectively in SiBCS and WRB. Additionally, 81% of the profiles were classified as Anthrosols in the WRB, according to the new criteria. Another aspect mentioned in the literature about ADEs is the high magnetic susceptibility (MS), which is related to changes in the structure of the soil minerals caused by heating when fire (burning, bonfires) is used during the period of human occupations. MS can be quickly analyzed through the use of proximal sensors, thus resulting in another way to identify pre-historic human occupation sites. In a preliminary study at the Experimental Research Field of *Caldeirão*, municipality of *Irlanduba (AM)*, the MS of samples of soil layers identified as anthropic and non-anthropic was evaluated. The classification of the samples followed the current WRB criteria for the Pretic horizon. In the anthropic samples, the MS values were higher, and there was a positive and high correlation between the SM and P and Zn levels, differently from the non-anthropic samples.

**Keywords:** Standardization of data. Amazonian Dark Earth. Soil classification criteria. Magnetic susceptibility.

## LISTA DE ABREVIACOES E SMBOLOS

TPI	Terra Preta de Índio
ADE	Amazonian Dark Earth
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
WRB	World Reference Base for Soil Resources
CTC	Capacidade de Troca Catinica
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
K	Potássio
P	Fósforo
Na	Sódio
Al	Alumínio
H	Hidrognio
N	Nitrogênio
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
SB	Soma de Bases
Corg/ OC	Carbono Orgânico/ <i>Organic Carbon</i>
SM	Susceptibilidade Magnética
FPT/PTF	Funções de Pedotransferência/ <i>Pedotransfer Functions</i>
RSE	<i>Residual Standard Error</i>
TS	Areia Total ( <i>Total Sand</i> )
AQP	Algoritmos para Pedologia Quantitativa ( <i>Algorithm for Quantitative Pedology</i> )
IQR	Intervalo Interquartlico
AM	Amazonas
US	United States
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
SI	Sistema Internacional de Unidades de Medida

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Soil map profiles of the data set and the Brazil climate zones. ....	8
<b>Figura 2.</b> Soil attributes boxplots (n = 132) of different soils classes of Brazil. ....	11
<b>Figura 3.</b> Correlogram between density and the nine possible predictive variables for the development of pedotransfer functions. ....	12
<b>Figura 4.</b> Linear models Fitted vs. Residual plot. (a) total sand as predictor; (b) clay as predictor; (c) organic carbon as a predictor. ....	13
<b>Figura 5.</b> Scatterplot of (a) total sand (g kg <sup>-1</sup> ) vs. density (g cm <sup>-3</sup> ); (b) clay (g kg <sup>-1</sup> ) vs. density (g cm <sup>-3</sup> ) and (c) organic carbon (g kg <sup>-1</sup> ) vs. density (g cm <sup>-3</sup> ).....	15
<b>Figura 6.</b> Fitted values vs. Standardized Residuals Plot (left panels) and the standardized residuals in a normal Q-Q Plot (right panels) to (a) PTF1, (b) PTF2, and (c) PTF3.....	17
<b>Figura 7.</b> Scatterplots of K <sup>+</sup> measured vs predicted data, using PTF1 (a), PTF2 (b) and PTF3 (c). Validation samples from Latossolo Amarelo (Xanthic Oxisols), Flona Tapajós (PA). ....	19
<b>Figura 8.</b> Mapa da distribuição dos perfis de TPI na região Amazônica brasileira. ....	33
<b>Figura 9.</b> Representação de cor, usando os padrões da Carta de Munsell, e espessura dos horizontes A antrópicos de perfis na base de dados (número 1 ao 26), de acordo com o pacote AQP (BEAUDETTE et al., 2011). ....	37
<b>Figura 10.</b> Representação de cor, usando os padrões da Carta de Munsell, e espessura dos horizontes A antrópicos de perfis na base de dados (número 27 ao 53), de acordo com o pacote AQP (BEAUDETTE et al., 2011). ....	38
<b>Figura 11.</b> Representação de cor, usando os padrões da Carta de Munsell, e espessura dos horizontes A antrópicos de perfis na base de dados (número 54 ao 79), de acordo com o pacote AQP (BEAUDETTE et al., 2011). ....	39
<b>Figura 12.</b> Representação de cor, usando os padrões da Carta de Munsell, e espessura dos horizontes A antrópicos de perfis na base de dados (número 80 ao 104), de acordo com o pacote AQP (BEAUDETTE et al., 2011). ....	40
<b>Figura 13.</b> Boxplot da granulometria dos horizontes A antrópicos nos perfis compilados. ....	41
<b>Figura 14.</b> Boxplots dos atributos químicos dos horizontes antrópicos do acervo de dados. ....	44
<b>Figura 15.</b> Boxplots dos teores de Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> dos perfis de TPI da base de dados que tiveram valores de mediana até 10 cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> . A linha azul passa pelo eixo y dos teores de Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> correspondente ao valor de 2,0 cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> .....	45
<b>Figura 16.</b> Boxplots dos teores de Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> dos perfis de TPI da base de dados que tiveram valores de mediana superior a 10 cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> .....	46
<b>Figura 17.</b> Distribuição de número de perfis de solos com horizontes antrópicos em função de intervalos de classes de teores de P em mg kg <sup>-1</sup> . ....	48
<b>Figura 18.</b> Boxplots dos teores de P dos perfis de TPI do acervo de dados com medianas até 100 mg kg <sup>-1</sup> . A linha pontilhada azul passa pelo eixo y no teor de P de 30 mg kg <sup>-1</sup> . ....	49
<b>Figura 19.</b> Boxplots dos teores de P dos perfis de TPI do acervo de dados com medianas entre 100 e 250 mg kg <sup>-1</sup> . ....	50
<b>Figura 20.</b> Boxplots dos teores de P dos perfis de TPI do acervo de dados com medianas entre 250 e 750 mg kg <sup>-1</sup> . ....	51

<b>Figura 21.</b> Boxplots dos teores de P dos perfis de TPI do acervo de dados com medianas superiores a $750 \text{ mg kg}^{-1}$ .....	52
<b>Figura 22.</b> Boxplots dos teores de Corg. dos perfis de TPI da base de dados com valores de mediana até $15,0 \text{ g kg}^{-1}$ . A linha azul passa pelo eixo y dos teores de Corg em $10,0 \text{ g kg}^{-1}$ e a linha vermelha em $6,0 \text{ g kg}^{-1}$ .....	54
<b>Figura 23.</b> Boxplots dos teores de Corg. dos perfis de TPI da base de dados com valores de mediana entre $15,0$ e $30,0 \text{ g kg}^{-1}$ .....	55
<b>Figura 24.</b> Boxplots dos teores de Corg. dos perfis de TPI da base de dados com valores de mediana superior a $30,0 \text{ g kg}^{-1}$ .....	56
<b>Figura 25.</b> Gráfico QQPlot para a normalidade dos dados de SM por camada.....	66
<b>Figura 26.</b> <i>Boxplots</i> dos valores de SM ( $10^{-3}$ SI) nas camadas com diferentes profundidades e separadas entre antrópicas e não antrópicas. ....	69
<b>Figura 27.</b> Visualização da correlação em rede entre a SM e alguns atributos de camadas de solos antrópicos (a) e não antrópicos (b). ....	71

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Table 1.</b> Soil profiles number and parent material of each data reference source. ....	9
<b>Table 2.</b> Pedotransfer functions developed to predict the fine earth density and the respective model indexes. Density: fine earth density ( $\text{g cm}^{-3}$ ); TS: total sand; OC: organic carbon ( $\text{g kg}^{-1}$ ); RSE: residual standard error; SE: standard error of parameters; $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ : parameters of the function. All PTF show the same degrees of freedom (129) .....	16
<b>Table 3.</b> Descriptive statistics of residual values of PTF. SD: standard deviation; Max: Maximum; Min: Minimum and SE: Standard error. ....	18
<b>Table 4.</b> Amplitude and descriptive analysis of data from 88 soil samples, 0 – 0.05 and 0.10 – 0.15 m depths, from a <i>Latosolo Amarelo</i> (Xanthic Oxisols), Flona Tapajós, Amazon... ..	18
<b>Table 5.</b> Data from literature of calcium plus magnesium ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ) in the volumetric base converted to the gravimetric basis ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) through PTF1.....	21
<b>Tabela 6.</b> Número total de perfis compilados e avaliados de acordo com os critérios vigentes e propostos do sibcs e WRB.....	59
<b>Tabela 7.</b> Teste de Shapiro Wilk ( $p > 0,05$ ) para a normalidade dos dados de SM por camadas. ....	66
<b>Tabela 8.</b> Estatística descritiva da SM (10-3 SI) das camadas antrópicas e não antrópicas. ...	68

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>3</b>
<b>FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A CONVERSÃO DE UNIDADES DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO.....</b>	<b>3</b>
1 RESUMO.....	4
2 ABSTRACT .....	5
3 INTRODUCTION (INTRODUÇÃO) .....	6
4 MATERIAL AND METHODS (MATERIAL E MÉTODOS) .....	8
4.1 Soil samples selection and measurement of fine earth density (density) .....	8
4.2 Selection of the prediction variables .....	10
4.3 Pedotransfer function models .....	12
4.4 Models validation .....	14
5 RESULTS (RESULTADOS) .....	15
6 DISCUSSION (DISCUSSÃO).....	20
7 CONCLUSIONS (CONCLUSÕES).....	23
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>24</b>
<b>CRITÉRIOS TAXONÔMICOS PARA CLASSIFICAÇÃO DO HORIZONTE ANTRÓPICO NO SIBCS E <i>PRETIC</i> NO WRB.....</b>	<b>24</b>
1 RESUMO.....	25
2 ABSTRACT .....	26
3 INTRODUÇÃO.....	27
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1 Compilação dos dados .....	31
4.2 Avaliação dos dados.....	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
5.1 Espessura e cor dos horizontes antrópicos .....	34
5.2 Granulometria.....	41
5.3 Atributos químicos.....	42
5.4 Análise dos critérios vigentes para definir o horizonte A antrópico e Pretic horizon e propostas para o SiBCS e WRB .....	57
6 CONCLUSÕES .....	60
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>61</b>
<b>SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA EM CAMADAS DE SOLOS COM E SEM INFLUÊNCIA ANTRÓPICA: ESTUDO PRELIMINAR NO CAMPO EXPERIMENTAL DO CALDEIRÃO, MUNICÍPIO DE IRANDUBA (AM).....</b>	<b>61</b>
1 RESUMO.....	62
2 ABSTRACT .....	63
3 INTRODUÇÃO.....	64
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	65
4.1 Área de estudo e seleção das amostras .....	65
4.2 Análise da susceptibilidade magnética (SM).....	65
4.3 Análise dos dados .....	65
4.4 Análise de correlação entre a SM e atributos do solo .....	67
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68

5.1 Susceptibilidade magnética (SM).....	68
5.2 Correlação entre a SM e atributos do solo.....	70
6 CONCLUSÕES .....	72
<b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>82</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

Solos com horizontes antrópicos no Brasil ocorrem em várias regiões, mas foram reportados até hoje, principalmente, na região Amazônica, sendo identificados como Terra Preta de Índio (TPI) e referidas como Amazonian Dark Earths (ADE) em várias literaturas na língua inglesa. Estas unidades pedológicas apresentam datações que evidenciam o início de sua formação ocorreu entre 500 e 2500 anos antes do presente (NEVES et al., 2004). Esses sítios de ocupação humana pré-histórica estão, em sua maioria, próximos de rios e cursos de água, ocupando as áreas de várzeas, mas também se estendem a elevações marginais adjacentes e a terra firme interior (KÄMPF; KERN, 2005). Além da importância para estudos arqueológicos das populações antigas, esses solos despertam o interesse de pedólogos pelos horizontes superficiais geralmente com maiores teores de nutrientes que solos não antrópicos adjacentes.

Revisão sobre as origens da TPI é apresentada por Kämpf e Kern (2005), com diversas hipóteses sobre a pedogênese da TPI; algumas destacando a sua origem não antrópica, ou seja, origem geogênica, devido ao acúmulo de cinzas vulcânicas e a sedimentação de lagos (SCHAEFER et al., 2017). Alguns autores entendem que há intencionalidade na gênese das TPIs, sendo uma forma de manejar a fertilidade do solo e aumentar a produtividade das culturas (ARROYO-KALIN, 2010; DENEVAN, 2004). Outros estudos vêm contribuindo com evidências de que esses sítios eram apenas locais de descarte acidental de detritos (ARROYO-KALIN, 2009; KERN; DA COSTA; FRAZÃO, 2004; SCHMIDT et al., 2014). Assim, a gênese desses solos é tema amplamente discutido e, em geral, considera-se que sua formação está associada à ocupação e atividade humana, sendo fundamentado por evidências arqueológicas e pedológicas (KÄMPF & KERN, 2005; TEIXEIRA, 2007; MACEDO et al., 2019).

O termo TPI originou da identificação desses solos em áreas de comunidades indígenas, com presença de artefatos indicando ocupação humana e cor escura dos horizontes superficiais. Essa coloração pode estar associada à presença de *black carbon*, que são estruturas de carbono que desempenham funções importantes no solo: estabilidade da matéria orgânica, maior intensidade de cargas negativas aumentando a capacidade de troca de cátions (CTC) dos solos e alto poder de pigmentação (GLASER, 2007). As TPI apresentam altos valores de pH em água, cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e fósforo disponível (doravante, apenas P); elevada CTC e saturação de bases (SB) e maiores teores de alguns micronutrientes, por exemplo, o zinco (Zn), manganês (Mn) e bário (Ba) (KÄMPF; KERN, 2005). Comumente são apontados como solos de elevada fertilidade natural, com alta estabilidade e reatividade da matéria orgânica, tornando as TPI diferenciadas em relação aos solos amazônicos adjacentes não antrópicos.

Diante disso, avaliar e analisar os principais atributos de TPI, sejam eles físicos ou químicos, é importante para melhor entender e caracterizar seus processos. Dentre as alternativas para estudar os solos, a construção de banco de dados por meio da compilação das informações provenientes de diversos trabalhos científicos é importante para estabelecer padrões gerais. No entanto, grandes quantidades de dados compilados podem apresentar inconsistências nas unidades dos atributos químicos, devido à adoção de diferentes metodologias laboratoriais. Essas inconsistências nas unidades podem influenciar na análise

dos dados e na tomada de decisão quanto à proposição de eventuais critérios de classificação das TPI, exigindo a conversão das unidades dos atributos químicos do solo. Nesse sentido, funções de pedotransferência podem ser úteis, pois, segundo Budiman et al. (2003) permitem obter informações de solos de difícil medição, caras e trabalhosas, através do uso de outras informações que são normalmente quantificadas de forma mais fácil e com menor custo.

Solos identificados como TPI são classificados em várias ordens no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), sempre caracterizados em nível taxonômico inferior pela presença do horizonte diagnóstico superficial A Antrópico (SANTOS et al., 2018). No sistema internacional de classificação de solos - *World Reference Base for Soil Resource* (WRB) (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015) as TPI (ADE) são identificadas pelo horizonte superficial *Pretic*. Porém, os critérios quantitativos atuais para definir o horizonte antrópico no SiBCS e o *Pretic* do WRB não permitiram classificar 50% dos perfis com presença de artefatos e cores escuras, identificados por vários autores como TPI e compilados em extenso banco de dados de solos brasileiros. O que indica a importância de validação e aperfeiçoamento dos critérios.

Em estudos de sítios de TPI na Amazônia Central, Arroyo-Kalin et al. (2008) relatam elevada susceptibilidade magnética (SM) nos solos, bem como elevados teores de Corg, Ca<sup>2+</sup>, P, Mg<sup>2+</sup>, potássio (K), Ba, cobre (Cu), Mn, estrôncio (Sr) e Zn, que foram atribuídos à ação antrópica. Em TPIs localizadas próximo ao rio Xingu (Bacia Amazônica), Schmidt (2013) verificou que alguns atributos que foram enriquecidos antropicamente tendem a diminuir seus valores de forma significativa ao longo do tempo, exceto o pH (H<sub>2</sub>O), o Ba, o Mn, o Sr e a SM, que permaneceram estáveis ao longo dos anos. Os autores apontam que tais atributos podem ser eficazes para detectar e documentar ocupação humana pretérita, principalmente em solos que têm teores altos de fósforo e cátions trocáveis, independente da presença de horizonte A antrópico, como ocorre nas proximidades do rio Xingu (SCHMIDT, 2013).

Desta forma, este trabalho possui três hipóteses: (i) funções de pedotransferência podem ser usadas para converter unidades de atributos químicos de solo provenientes de distintos métodos laboratoriais (i.e., que diferem quanto ao tipo de preparo de amostras); (ii) os critérios quantitativos atuais para os horizontes diagnósticos superficiais antrópicos do SiBCS e do WRB restringem a classificação de solos identificados como TPI e, com a proposição de critérios originados de análise de banco de dados, pode ser obter uma melhor classificação de TPI; e (iii) a susceptibilidade magnética em amostras de solos com horizontes antrópicos (TPI) é maior em comparação as de solos não antrópicos.

O trabalho foi organizado em três capítulos. O primeiro capítulo - Funções de pedotransferência para a conversão de unidades de atributos químicos do solo, teve como objetivo de desenvolver funções de pedotransferência para a conversão de unidades de atributos químicos do solo e dessa forma padronizar dados compilados em extensos bancos de dados. O segundo capítulo - Critérios taxonômicos para classificação de horizontes antrópicos no SiBCS e o *pretic horizon* no WRB, teve como objetivos estabelecer padrões, validar e propor critérios taxonômicos quantitativos para os horizontes A Antrópico do SiBCS e *Pretic horizon* do WRB. O terceiro e último capítulo – Susceptibilidade magnética em camadas de solos antrópicos e não antrópicos: Estudo preliminar no Campo Experimental do Caldeirão, município de Iranduba (AM), teve como objetivo um estudo o introdutório da SM em TPIs.

## **CAPÍTULO I**

### **FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A CONVERSÃO DE UNIDADES DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO**

**(Pedotransfer Functions: The Role of Soil Chemical Attributes Units Conversion)<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Artigo publicado na Revista Brasileira de Ciência do Solo  
Cordeiro FR, Cesário FV, Fontana A, Anjos LHC, Canto ACB, Teixeira WG. Pedotransfer functions: the role of soil chemical attribute units conversion for soil classification. Rev Bras Cienc Solo. 2020; 44:e0190086. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20190086>

## 1 RESUMO

Os dados de análise química do solo podem ser expressos pela massa (isto é, base gravimétrica) ou pelo volume (isto é, base volumétrica) da terra fina seca ao ar (peneirada 2 mm), resultando em diferentes unidades,  $\text{cmolc kg}^{-1}$  e  $\text{cmolc dm}^{-3}$ , respectivamente. O problema é que a diferença entre os métodos para expressar os mesmos atributos do solo dificulta a comparação dos resultados e a padronização do banco de dados ou do conjunto de dados. Portanto, este trabalho tem como objetivo desenvolver funções de pedotransferência (FPT) para obter a densidade da terra fina, que será usada para a conversão dos dados expressos em base volumétrica para gravimétrica, ou vice-versa, que serão aplicados para comparar resultados e padronizar base de dados com unidades diferentes. Amostras de solos, incluindo perfis com as principais classes no SiBCS, como Latossolos (Ferralsols or Oxisols, respectivamente WRB e Soil Taxonomy) e Argissolos (Acrisols ou Ultisols, respectivamente WRB e Soil Taxonomy), dos estados de Rondônia, Roraima e Mato Grosso do Sul (132 horizontes) foram selecionadas e pesadas (em triplicata) para obter a massa de terra fina contida em um volume de  $10 \text{ cm}^3$ . Os valores de massa foram utilizados para calcular a densidade da terra fina (a seguir, denominada apenas densidade). A análise de correlação de Spearman foi utilizada entre densidade e nove atributos do solo (areia grossa, areia fina, areia total, silte, argila, argila dispersa na água, dispersão da argila, densidade de partículas e carbono orgânico). A areia total, argila e carbono orgânico apresentam as melhores correlações, portanto foram selecionados para a construção de funções de pedotransferência. Técnicas de regressão não linear foram usadas para obter os modelos (PTFs) para prever a densidade, que foi usada para a conversão da unidade. Como resultado, as estatísticas de erro padrão residual (RSE) dos modelos foram: 0,092, 0,1231 e 0,1633  $\text{g cm}^{-3}$ , respectivamente para FPT1 (usando areia total como preditor), FPT2 (usando argila) e FPT3 (usando carbono orgânico). Dados independentes foram utilizados para avaliar a precisão dos modelos por análise de resíduos e o RSE. Para a validação, o menor RSE obtido foi do PTF1, portanto, o melhor desempenho. Assim, para converter valores dos atributos químicos de uma base volumétrica para gravimétrica, o valor deve ser dividido pela densidade prevista. Por outro lado, a conversão de base gravimétrica para volumétrica requer que o valor seja multiplicado pela densidade prevista. Os PTFs, utilizando os atributos areia total, argila e carbono orgânico como variáveis predictoras, permitiram a conversão de dados analíticos de amostras de solo expressos em base volumétrica em gravimétrica e vice-versa, que podem ser utilizados para padronização de conjuntos de dados ou banco de dados.

**Palavras-chave:** Padronização de dados. Análise de Solos. Regressão não linear.

## 2 ABSTRACT

Chemical soil analysis data can be expressed by weight (i.e., gravimetric basis) or volume (i.e., volumetric basis) of the fine earth (sieved 2 mm), resulting in different units,  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  and  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectively. The research problem is that the difference between methods to express the same soil attributes makes the comparison of results and database or dataset standardization difficult. This paper aims to develop pedotransfer functions (PTF) to obtain the density of fine earth, which will then be used for conversion data expressed in volumetric to gravimetric basis, or vice versa, that will be applied to compare results and to standardize databases with different units. Soils samples, including profiles of the main soil orders in Brazilian soil classification system as *Latossolos* (Ferralsols or Oxisols, respectively WRB and Soil Taxonomy) and *Argissolos* (Acrisols or Ultisols, respectively WRB and Soil Taxonomy), from the states of Rondônia, Roraima, and Mato Grosso do Sul (132 horizons) were selected and weighed (in triplicate) to obtain the fine earth mass contained in a volume of  $10 \text{ cm}^3$ . The mass values were used to calculate the fine earth density (density). Spearman's correlation analysis was used between density and nine soil attributes (coarse sand, fine sand, total sand, silt, clay, clay dispersed in water, clay dispersion, particle density, and organic carbon). The total sand, clay, and organic carbon show the best correlations; therefore, they were selected to construct the pedotransfer functions. Nonlinear regression techniques were used to obtain the models (PTFs) to predict density, which was used for the unit's conversion. As a result, the residual standard error (RSE) statistics of the models were: 0.092, 0.1231, and  $0.1633 \text{ g cm}^{-3}$ , respectively for PTF1 (using total sand as a predictor), PTF2 (using clay), and PTF3 (using organic carbon). Independent data was used to evaluate the accuracy of the models by residue analysis and the RSE. For the validation, the lowest RSE obtained was from the PTF1, so the best performance. Thus, to convert values of the chemical attributes from a volumetric to gravimetric basis, the value must be divided by the predicted density. On the other hand, the conversion from gravimetric to volumetric basis requires that the value be multiplied by the predicted density. The PTFs using the attributes total sand, clay, and organic carbon as predictor variables, allowed conversion of analytical data of soil samples expressed in the volumetric basis to gravimetric and vice versa, which can be used for dataset or database standardization.

**Keywords:** Data standardization. Soil analysis. Nonlinear regression.

### 3 INTRODUCTION (INTRODUÇÃO)

The majority of soil chemical and physical analyses start with the preparation of samples in the laboratory, through drying and maceration, followed by sieving (2 mm) to obtain the called fine earth (TEIXEIRA et al., 2017). To carry out the chemical analysis, a certain weight or volume of fine earth is taken to be analyzed. In general, there are two ways to obtain the sample: (i) using the fine earth mass (i.e., 10 g), thus expressing results in a gravimetric basis, that is,  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ,  $\text{g kg}^{-1}$  or  $\text{mg kg}^{-1}$  (TEIXEIRA et al., 2017); and (ii) using the fine earth volume (i.e.,  $10 \text{ cm}^3$ ) and expressing the results in a volumetric basis, that is,  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  or  $\text{mg dm}^{-3}$  (SILVA et al., 2009).

The most common procedure to evaluate soil fertility in Brazil and countries such as the U.S.A., is to sample volumetrically the fine earth by using a device that consists of a small cylinder with a  $10 \text{ cm}^3$  volume (SILVA et al., 2009; SOIL SURVEY STAFF, 2014a). This device gives convenience and speed in the process of sample preparation for chemical analysis. The adoption of this method began in Brazil and Latin America since 1966 with the support of North Carolina State University (USA) to evaluate more samples in less time and return fertility recommendations to producers faster (SOIL SCIENCE DEPARTMENT, 1966). Therefore, the manuals for recommendations of lime and fertilizers adopted in Brazil express the chemical attributes on a volumetric basis (e.g., FREIRE et al., 2013; PREZOTTI et al., 2013; CQFS-RS/SC, 2016). In soil survey analyzes for pedological purposes, the results are commonly expressed as the gravimetric base. Details about the chemical attributes for soil classification and chemical analyses units are presented in IUSS Working Group WRB (2015), Santos et al. (2018), Soil Survey Staff (2014b), Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual (SOIL SURVEY STAFF, 2014a), and the Manual for soil and water analysis (BUURMAN et al., 1996).

These two soil sampling procedures, which result in data expressed with different units, make difficult data comparisons and standardization of soil dataset or database. Thus, the conversion of the data analyzed on a mass basis to the volumetric basis, or vice versa, is necessary to evaluate data with more accuracy. The variation of results expressed by mass or volume depends of the fine earth fraction density (MEHLICH, 1972), which is related to the granulometric composition and organic carbon in the sample, as pointed by Stewart et al. (1970), Qiao et al. (2019), and Patton et al. (2019).

The problems of reporting the analytical soil results in different units was discussed by Mehlich (1972), as well as the differences when the results were expressed as soil mass or volume. The author discusses the importance of the volume weight (i.e., the fine earth density) for the conversion of units obtained on a volumetric or gravimetric basis and emphasizes that volumetric base data will only be equal to the gravimetric data if the fine earth density from the soil sample is precisely  $1.0 \text{ g dm}^{-3}$ . Further, the multiplication of the gravimetric data by the fine earth density converts the data to the volumetric unit. For soils that do not have  $1.0 \text{ g dm}^{-3}$  density, it is necessary to obtain the fine earth density to convert the units.

An option for conversion of these units is the use of pedotransfer functions (PTF), that involves the application of statistical models. Soil data attributes, which are difficult, expensive,

and laborious to be obtained, can be predicted by PTF using other easily accessible and economically affordable soil attributes (MCBRATNEY et al., 2002).

The PTF has been widely used around the world. Qiao et al. (2019) used PTF to estimate soil density at the Loess Plateau in China, formed from deep deposits of sediments. The authors used organic carbon, texture, and soil depth as explanatory variables for the prediction of soil densities. Ottoni et al. (2018) developed PTF to estimate soil hydraulic conductivity for a database of Brazilian tropical soils and European temperate soils, using as predictor variables soil texture and effective porosity. Dobarco et al. (2019) developed PTF to estimate available soil water from a French soil dataset, with contents of sand, clay, organic carbon, and bulk density as predictor variables. Patton et al. (2019) used PTF to estimate the bulk density of the thin fraction of soils from the Reynolds Creek Critical Zone Observatory, USDA Agricultural Research Service site. The percentage of organic carbon measured in soils derived from felsic and mafic lithologies and the particle size distribution were used as predictor variables. The authors point to the importance of incorporating these predictor variables to provide a reliable fine fraction density and, consequently, to estimate soil carbon stocks.

Studies using PTFs in Brazilian soils show consistent results for several soil attributes. Nascimento et al. (2015) developed PTF using different variables such as sand, silt, clay, soil density, and organic carbon to estimate the available water content in Xanthic Oxisols and Ultisols from a coastal tableland landscape database, from different locations in Brazil. Other studies used soil predictors, such as granulometry, organic carbon content, soil density, texture, and moisture, to estimate the water retention curve in different Brazilian soils (VAN DEN BERG et al., 1997; GAISER et al., 2000). Beutler et al. (2017) used organic carbon and clay content in Histosols and in other soils with high organic matter content, to predict the soil bulk density obtained in non-deformed soil samples. Likewise, Benites et al. (2007) also predicted bulk density by using organic carbon, clay, total nitrogen, and the sum of bases for Brazilian soils in general.

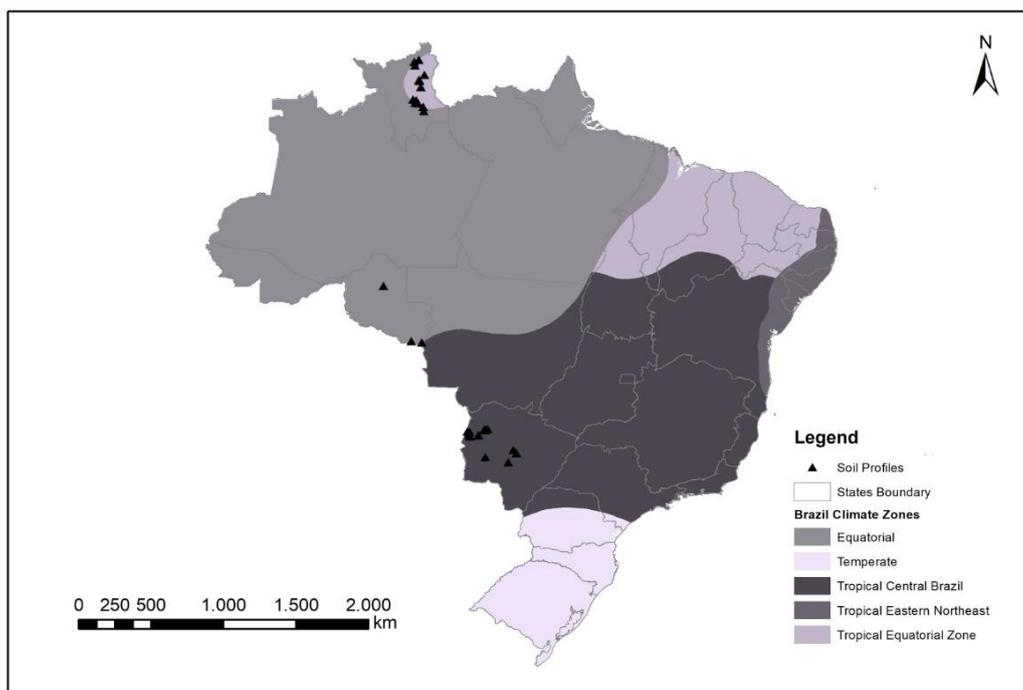
Taking into account that the access to soil samples already analyzed by fine earth mass or fine earth volume may be impracticable, the use of PTF helps to obtain the fine earth density and then to convert the units. To date, there are no studies proposing PTF for the prediction of the fine earth density to convert units expressed in the volumetric to gravimetric basis, or vice versa. Therefore, this paper aims to propose PTFs to obtain the fine earth density (hereinafter called just density) of mineral soils, which will be used for conversion of soil chemical attributes expressed in volumetric basis to gravimetric basis, or vice versa.

## 4 MATERIAL AND METHODS (MATERIAL E MÉTODOS)

### 4.1 Soil samples selection and measurement of fine earth density (density)

Profiles representing soil orders from Brazil, including the two most common (*Latossolos* and *Argissolos*), were selected from recent Brazilian Soil Classification and Correlation Meeting studies (CARDOSO et al., 2012; BATISTA et al., 2018; LUMBRERAS et al., 2019), which occurred in Rondônia, Mato Grosso do Sul, and Roraima States (Figure 1). The sample selection considered an amplitude of the parameters that, according to the literature, are related to density, which are granulometry and carbon content. The soils selected (Table 1) were classified as *Latossolos* (Oxisols), *Argissolos* (Ultisols), *Plintossolos* (Plinthic Subgroups), *Neossolos* (Entisols), *Espodossolos* (Spodosols), *Gleissolos* (Entisols with aquic properties), and *Vertissolos* (Vertisols), according to Brazilian Soil Classification System (SiBCS) (SANTOS et al., 2018) and the Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014b), respectively.

According to the Köppen classification system, the climate conditions are tropical Aw for all profiles located at Rondônia and Mato Grosso do Sul; and tropical Af and Am in the profiles from Roraima. Samples of the surface and subsurface horizons were selected to comprehend the majority of diagnostic horizons defined in the SiBCS. Hence, they were included 3 profiles of Rondônia, 16 profiles of Mato Grosso do Sul, and 16 profiles of Roraima, totaling 132 samples. The organic horizons (O and H) were not included due to their particularities regarding the predictive attributes (e.g., sand, silt, and clay) and the high levels of organic matter.



**Figura 1.** Soil map profiles of the data set and the Brazil climate zones.

**Table 1.** Soil profiles number and parent material of each data reference source.

Source	Profile	Parent material	Source	Profile	Parent material
	08	Sandy clayey Sediments		01	Sandy clayey Sediments
RCC Rondônia (2017)	12	Crystalline Rocks of Jamari Group		02	Sandy clayey Sediments
	15	Sandy clayey Alluvial Sediments		04	Sandy Sediments
	01	Granite		05	Sandy Sediments
	02	Ferruginous Sandstone	RCC Mato Grosso do Sul (2012)	06	Sandy Sediments
	03	Ferruginous Sandstone		07	Limestone
	04	Ferruginous Sandstone		08	Colluvium from Granite decomposition
	05	Sandy Sediments		09	Sandy clayey Sediments
	06	Volcanic Acid and Intermediate rocks		10	Limestone
	07	Acid and Intermediate rocks		11	Siltstones and Limestones
RCC Roraima (2018)	08	Sandy clayey Sediments		12	Sandy Sediments
	09	Sandy clayey Sediments		13	Sandy clayey Sediments
	10	Basaltic and intermediate rocks		15	Limestone
	11	Granite		16	Basalts
	12	Colluvial-alluvial, sandy clayey Sediments		17	Sandstones
	13	Alluvial sediment of sandy texture		18	Basalts
	14	Acid and Intermediate rocks			
	15	Sandy Sediments			
	16	Clayey Alluvial sediments			

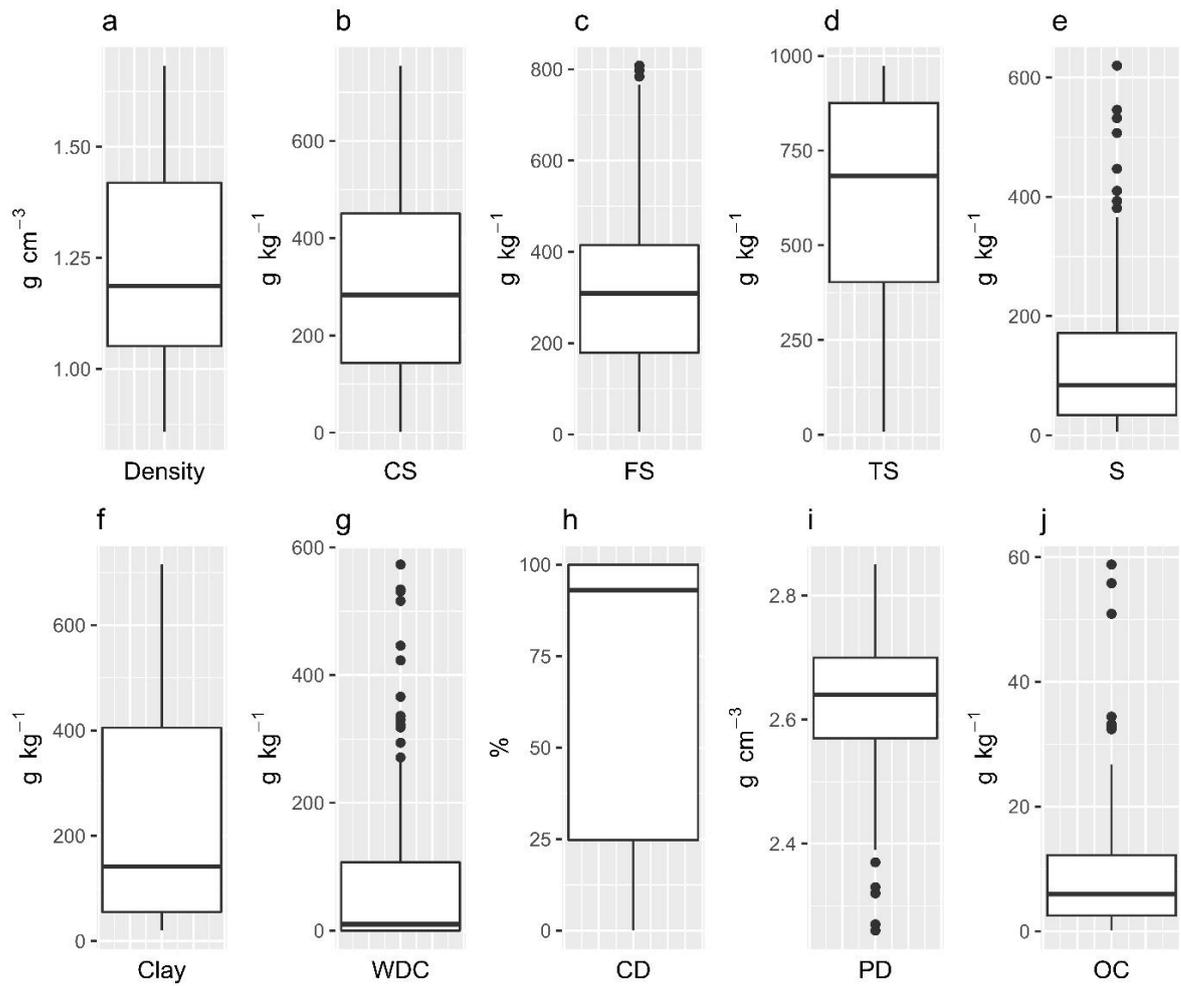
To measure the density, the soil sample mass contained in a 10 cm<sup>3</sup> device was weighted (precision scale  $\pm 0.001$  g) using triplicates. Then, the density was calculated from the corresponding mass values of each soil sample and the volume of the volumetric device.

## 4.2 Selection of the prediction variables

The following attributes were selected from available analyses of the soil samples: coarse sand, fine sand, total sand, silt, clay, water dispersed clay, clay dispersion, particle density, and organic carbon. The analyzes of these attributes were done in the laboratory following the methods described in Donagemma et al. (2011). Briefly, bulk soil samples were ground and passed through a 2 mm mesh sieve, to prepare fine earth samples, to be used for the following physical analyses: granulometry (with sodium hexametaphosphate as a dispersant for total clay) and clay dispersed in water, both using the densimeter method, and sieves for fractioning sand particle classes, with the silt obtained by difference. The particle density was obtained using the volumetric balloon, with alcohol, method. Total organic carbon was determined by the wet combustion method.

The attributes chosen are associated with the particle size (granulometry) and the amount of soil organic matter, which are the main components of the solid soil phase. Additionally, the particle density reflects partially the mineralogy of the sample, since it is related to the amount of iron oxides, silicate clays and quartz in the soil, as well as the amount of soil organic matter. Thus, they correspond to the possible predictive variables of density and are also attributes routinely measured in the laboratories for soil analyses. Boxplots (Figure 2) were used to graphically summarize the descriptive statistics of the attributes for density prediction.

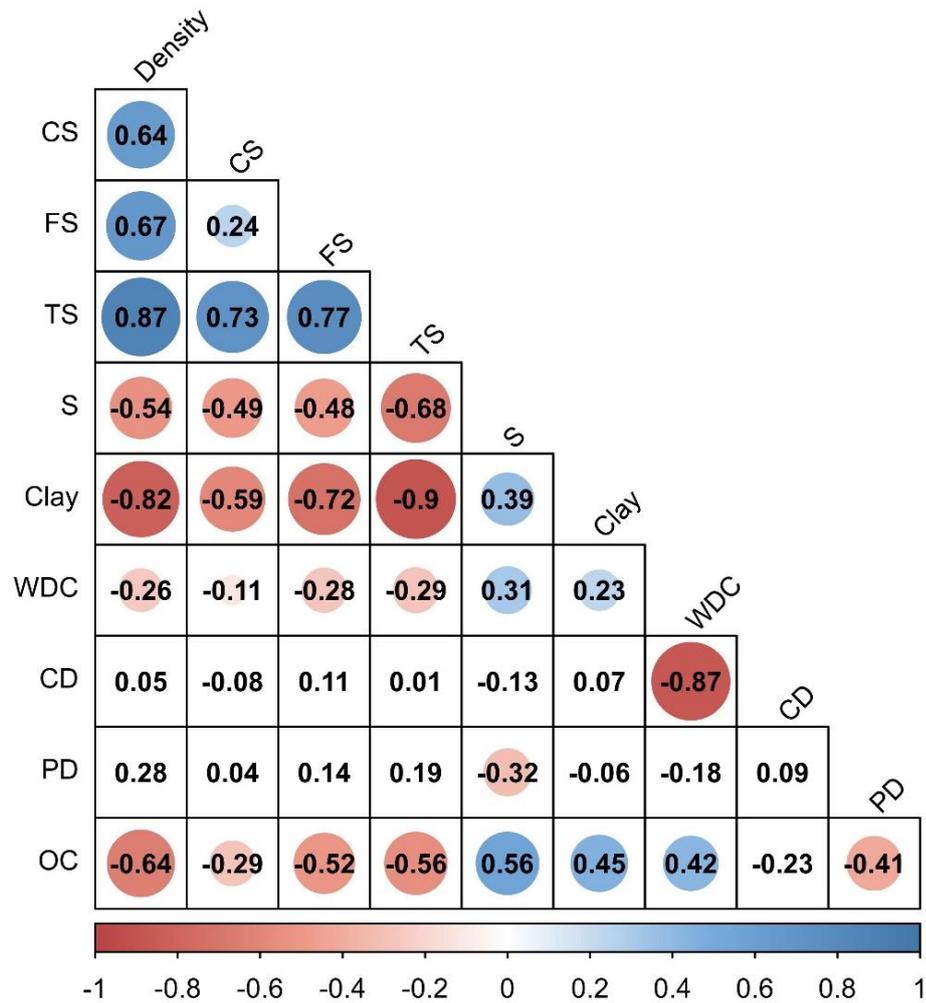
Spearman correlation (SPEARMAN, 1904) was used to support our prior pedological knowledge to identify which attributes were mostly associated with density, and then the correlogram was developed (Figure 3). The correlation values are presented at the intersection between rows and columns with the variables, ranging from -1 to 1. The circle and its diameter are proportional to the correlation value. The blank intersections indicate that the correlation was not significant ( $p > 0.05$ ), while colored intersections (i.e., red or blue) indicate that there was a significant correlation between the respective variables.



**Figure 2.** Soil attributes boxplots (n = 132) of different soils classes of Brazil.

Outliers (●). Density: Density of fine earth ( $\text{g cm}^{-3}$ ); CS: coarse sand, FS: fine sand, TS: total sand, S: silt, Clay: clay; WDC: water dispersed clay ( $\text{g kg}^{-1}$ ); CD: clay dispersion (%), PD: particle density ( $\text{g cm}^{-3}$ ), OC: organic carbon ( $\text{g kg}^{-1}$ ).

Based on the correlogram (Figure 3), the attributes with the highest values of significant correlations (negative or positive) with density were selected as predictors, to obtain the pedotransfer functions: total sand (TS) with a correlation of 0.85, clay with -0.76, and organic carbon (OC) with -0.55. Since the original structure and porosity of the soil samples is modified in the preparation process, the most prominent factors influencing the density were the total sand, clay, and organic carbon contents. The relation of these predictors with the fine fraction density were also discussed by Stewart et al. (1970), Qiao et al. (2019), and Patton et al. (2019), and it is corroborated by the results obtained in the correlation.

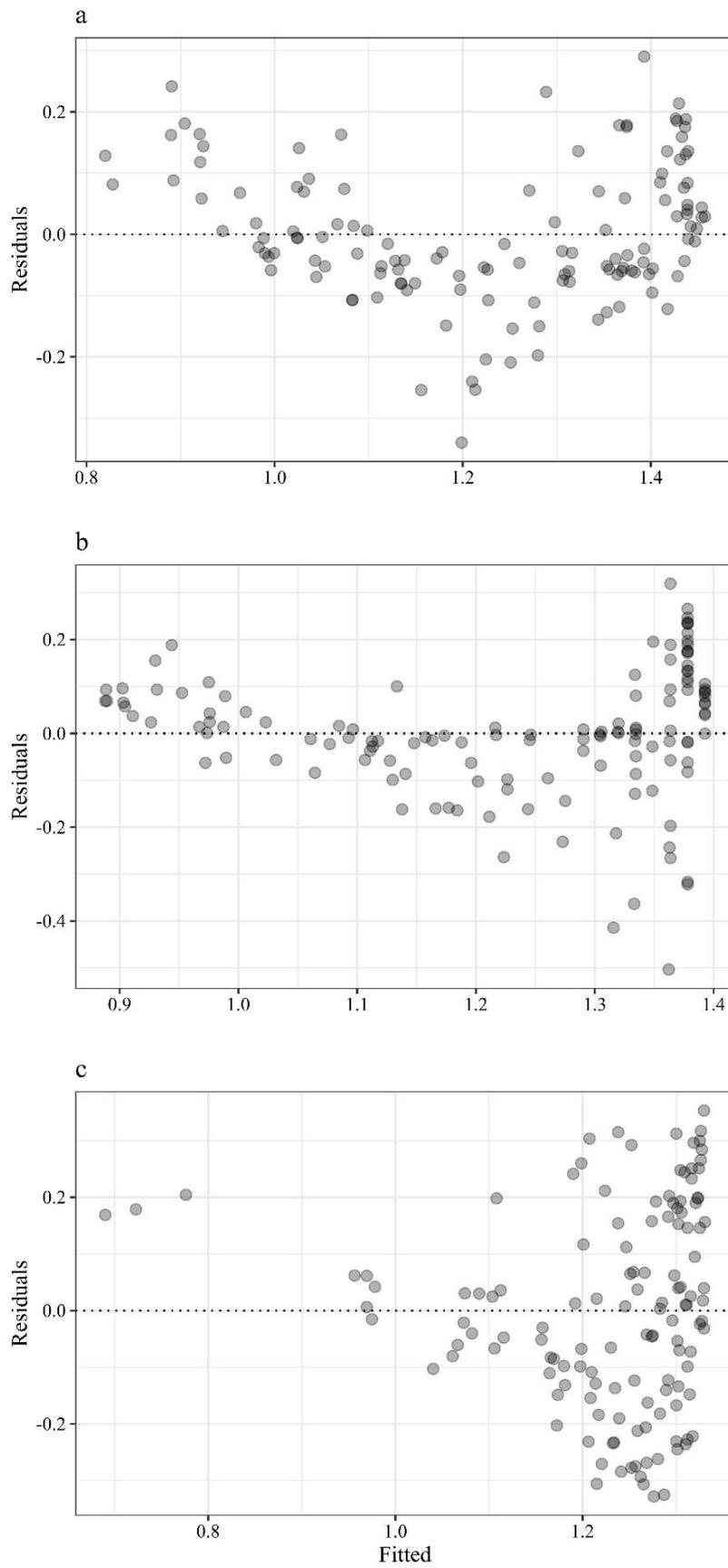


**Figura 3.** Correlogram between density and the nine possible predictive variables for the development of pedotransfer functions.

Density: Density of fine earth ( $\text{g cm}^{-3}$ ); CS: coarse sand, FS: fine sand, TS: total sand, S: silt, Clay: clay; WDC: water dispersed clay ( $\text{g kg}^{-1}$ ); CD: clay dispersion (%), PD: particle density ( $\text{g cm}^{-3}$ ), OC: organic carbon ( $\text{g kg}^{-1}$ ).

### 4.3 Pedotransfer function models

To construct the pedotransfer functions, firstly three linear models were fitted using TS, clay, and OC as explanatory variables. The three models were evaluated using a fitted vs. residual plot. The fitted vs. residual plot helps to identify if the relationship between the variables is linear (i.e., linearity) (RITZ; STREIBIG, 2008). All models exhibit a clear u- shaped pattern (Figure 4), and therefore nonlinear exponential models were performed.



**Figure 4.** Linear models Fitted vs. Residual plot. (a) total sand as predictor; (b) clay as predictor; (c) organic carbon as a predictor.

We look for equations that could be associated with the pedological/environmental field of study. Therefore, we found the role of reciprocal yield-density functions related to the fundamental relationship between crop yield and plant population (FARAZDAGHI; HARRIS, 1968), and, also the plant growth models equations (PAINE et al., 2012). All these equations resemble the phenomena modeling by soil variables in relation to density. Among four equations elected (e.g., Farazdaghi equations, rational model equations, reciprocal quadratic and exponential models) the exponential models (Equation 1) were selected to represent the increase or decrease in density as a function of total sand, clay or organic carbon.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \exp(\beta_2 x) \quad (\text{Equation 1})$$

The equation has three parameters for describing the curve:  $\beta_0$  the intercept,  $\beta_1$  the relative increase or decrease rate and  $\beta_2$  the exponential rate. The exponential model (Equation 1) was fitted using the TS, Clay, and OC as explanatory variables, totalizing three PTFs. The parameters for each PTFs were obtained using previous information to allow an adequate guess of starting values that were evaluated graphically to get plausible candidate model parameter values. For this purpose, nlstools provides a graphical function called preview, which can be used to assess the suitability of the chosen starting values, before fitting the model. This same approach was used by Ritz and Streibig (2008). The graphical examination was used jointly with the residual sum of squares result. Additionally, self-start functions were used to support the previous choice, except for  $\beta_0$ . The choice of good starting values is essential here because of the novelty in development PTFs for a predictive model. Following, the three PTFs were fitted (i.e., for TS, Clay, and OC), and the model's residual standard error (RSE) statistics were obtained; after that, the RSE (Equation 2) was used to compare the exponential models and to select the best (PETER, 2002). The RSE was calculated by the square root of the residual sum of squares divided by the degrees of freedom, and the lowest values indicate a better fit.

$$\text{RSE} = \sqrt{\frac{1}{d.f.} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (\text{Equation 2})$$

In which the  $\hat{y}_i$  are the predicted values,  $y_i$  are the mean values and  $d.f.$  is the degrees of freedom.

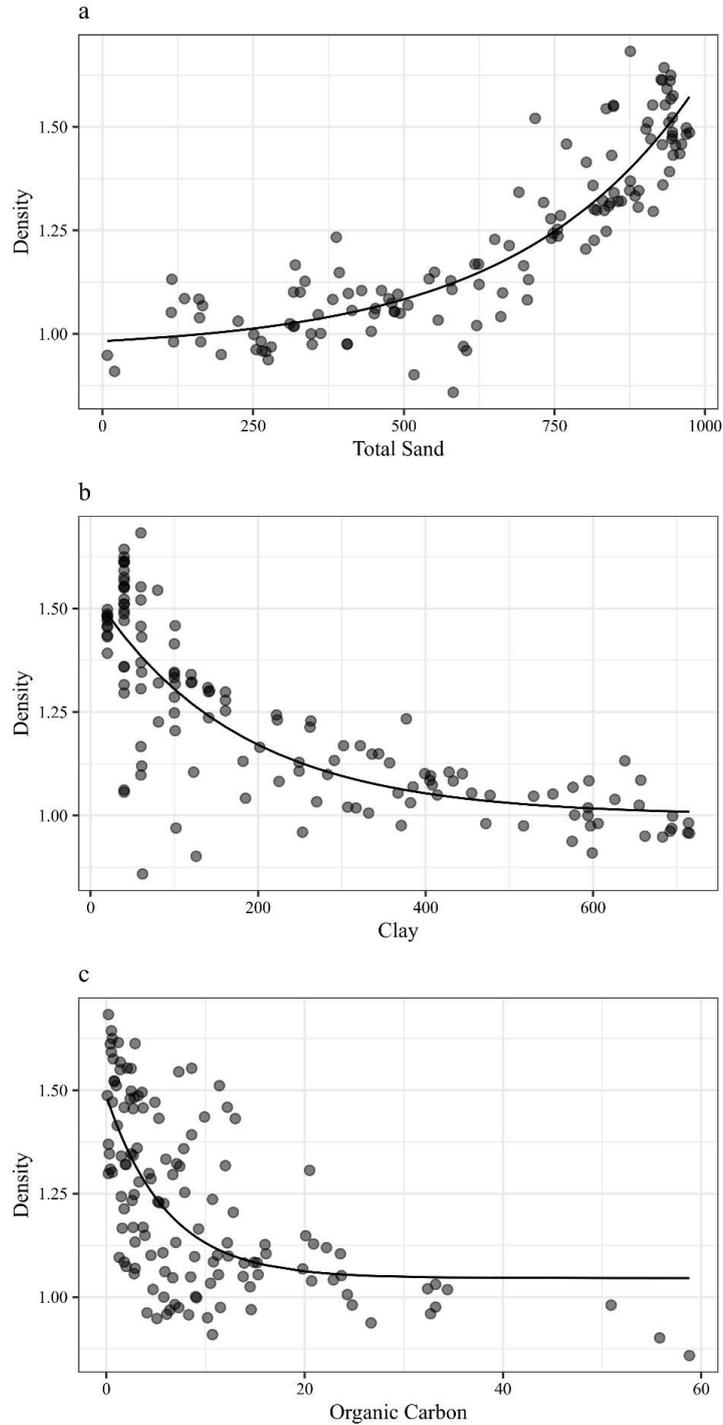
The standardized residuals in a normal Q-Q plot and the plot of the fitted values versus the standardized residuals were used to evaluate the normality of the residuals of the nonlinear models. The Normal QQ Plot compares the distribution of standardized residuals and the standard normal distribution. It is expected to obtain a straight line by intercepting the y-axis at zero and slope of 1 as the inference of the data normality satisfied (PETER, 2002). All analyses were performed using the software R (R CORE TEAM, 2013).

#### 4.4 Models validation

The evaluation of the accuracy of the models PTF validation was performed using data of exchangeable potassium ( $K^+$ ), available in both  $\text{mg dm}^{-3}$  and  $\text{mg kg}^{-1}$ , of 88 samples taken from 0.00-0.05 and 0.10–0.15 m layers from a *Latossolo Amarelo* (Xanthic Oxisols), from the *Flona Tapajós*, Pará State - Brazil (CESÁRIO, 2018). The validation was assessed through predicted vs. measured graphs and the residual standard error (RSE) for each PTF.

## 5 RESULTS (RESULTADOS)

The non-linear models between TS and density shows an increasing exponential pattern (Figure 5a), indicating that enhancing sand content increases density. On the other hand, the Clay and OC non-linear models shows a decreasing exponential pattern, indicating that decreasing values of Clay or OC (Figure 5b and 5c) increase density.



**Figura 5.** Scatterplot of (a) total sand ( $\text{g kg}^{-1}$ ) vs. density ( $\text{g cm}^{-3}$ ); (b) clay ( $\text{g kg}^{-1}$ ) vs. density ( $\text{g cm}^{-3}$ ) and (c) organic carbon ( $\text{g kg}^{-1}$ ) vs. density ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

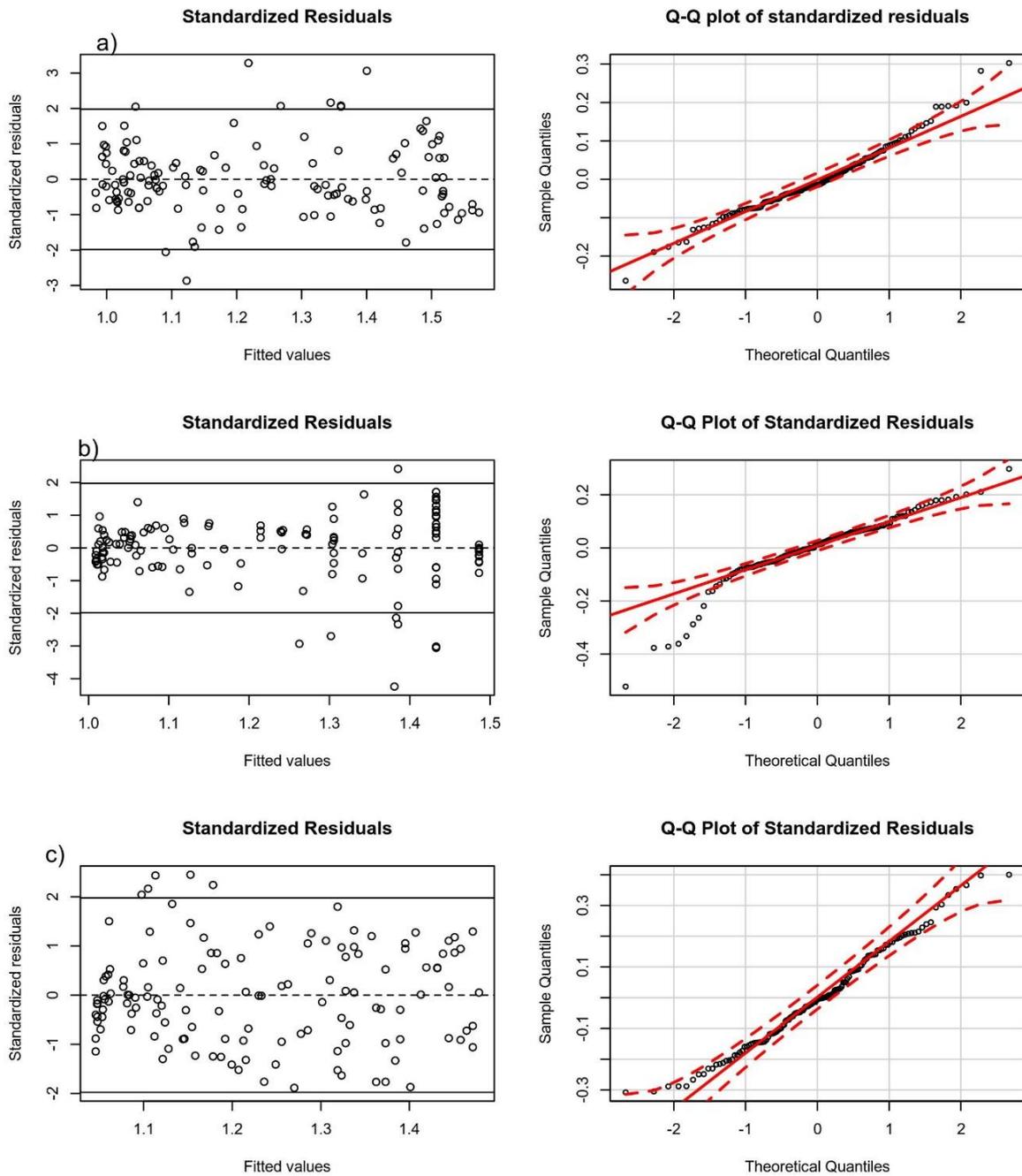
Three different models were developed to offer options for conversion, since not all data (TS, Clay or OC) might be available. The models were: i) PTF1, which uses TS as the predictor variable; ii) PTF2, using clay as a predictor; and iii) PTF3, with OC as a predictor (Table 2). The residual standard error (RSE) was calculated for each PTF. The PTF1 had the lowest RSE, 0.092 g cm<sup>-3</sup>, followed by PTF2 and PTF3 with 0.1231 and 0.1633 g cm<sup>-3</sup>, respectively. However, the dataset used for the development of PTF2 has some low clay contents, which can lead to high-density predictions, so it is recommended to use it with caution. The sequence for RSE is PTF1 < PTF2 < PTF3. This result shows the importance of TS in the density prediction, considering that RSE of PTF1 was 56% smaller than that of PTF3.

**Table 2.** Pedotransfer functions developed to predict the fine earth density and the respective model indexes. Density: fine earth density (g cm<sup>-3</sup>); TS: total sand; OC: organic carbon (g kg<sup>-1</sup>); RSE: residual standard error; SE: standard error of parameters;  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ : parameters of the function. All PTF show the same degrees of freedom (129)

	PTF1			PTF2			PTF3		
Equation	Density = 0.9594781 + (0.0229629 * exp (0.0033731*TS)			Density = 1.000383 + (0.545928 * exp (-0.005821 * C))			Density = 1.04583 + (0.43990 * exp (-0.16439 * OC))		
RSE	0.09227			0.1231			0.1633		
Parameters <sup>1</sup>	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$
SE	0.0329	0.0123	0.0005	0.0304	0.0340	0.0012	0.0382	0.0462	0.0460

<sup>1</sup> Parameters according to the equation 1 in the main text.

The residuals of the three PTFs were analyzed graphically, and the figure 6 shows the residuals graphs (e.g., fitted values vs. standardized residuals) and the Q-Q Plot for the three PTFs. For PTF1 and PTF3, no specific pattern was observed in the distribution of points, which confirms the assumption of normality. This result is also corroborated by the Normal Q-Q Plot of the same PTFs. In general, the analysis of PTF1 residues was slightly better than PTF3. Additionally, PTF2 presented a deviation from normality in the Q-Q plot, and the residue graph showed a trend in data distribution with results lower than PTF1 and PTF3. This indicates the lower accuracy of PTF2 in predicting density compared to other PTFs.



**Figure 6.** Fitted values vs. Standardized Residuals Plot (left panels) and the standardized residuals in a normal Q-Q Plot (right panels) to (a) PTF1, (b) PTF2, and (c) PTF3.

The descriptive statistics of residuals of each function (i.e., PTF1, PTF2, and PTF3) are presented in table 3. The maximum, minimum, and mean values (tending to zero), as well as the low value of the standard deviation show that the accuracy of the models is satisfactory. The PTF1 and PTF3 show low kurtosis values indicating the normal distribution of the residues. The PTF2 had high kurtosis values and non-normal distribution of the residues, which was corroborated by the Q-Q graph for the same function (Figure 6).

**Table 3.** Descriptive statistics of residual values of PTF. SD: standard deviation; Max: Maximum; Min: Minimum and SE: Standard error.

Functions	Mean	SD	Median	Max	Min	Kurtosis	SE
PTF1	0.00	0.09	-0.01	0.30	-0.26	0.89	0.01
PTF2	0.00	0.12	0.01	0.30	-0.52	3.19	0.01
PTF3	0.00	0.16	-0.01	0.40	-0.31	-0.5	0.01

#### - Models validation

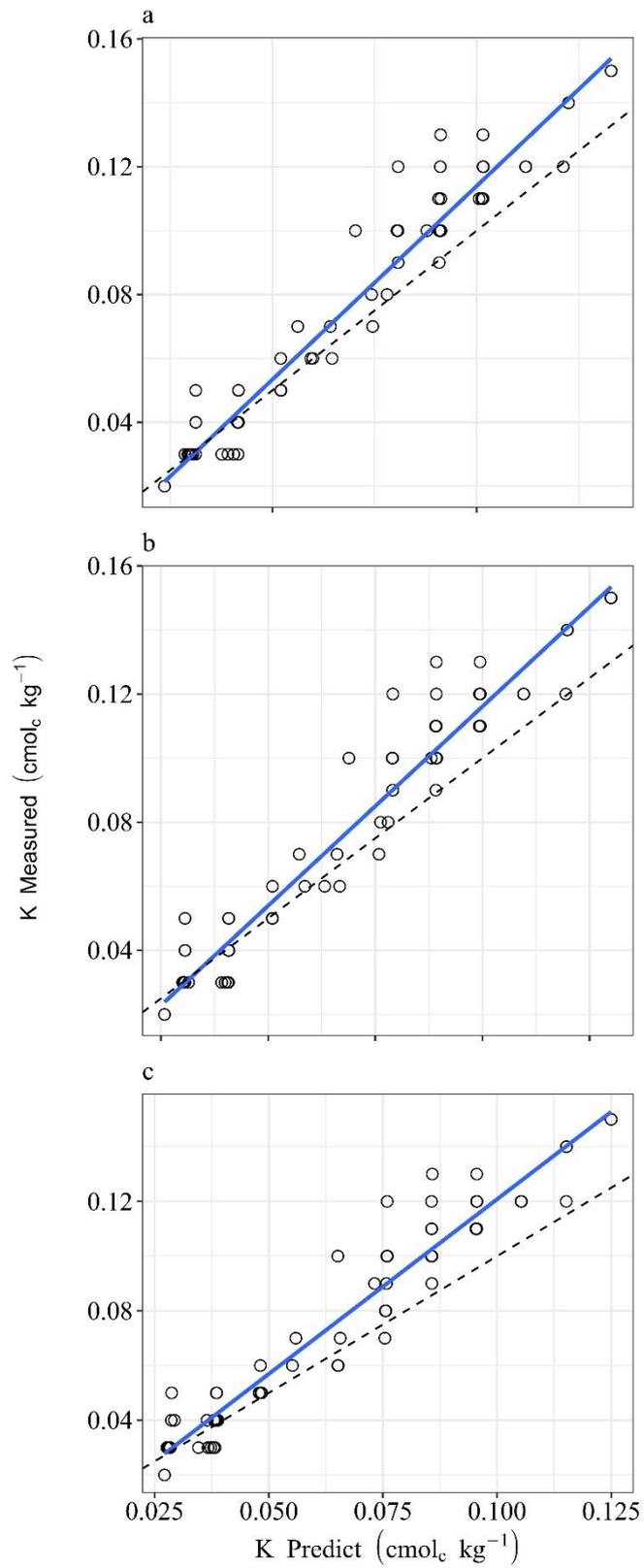
The three PTFs were applied to independent data, samples from the *Latossolo Amarelo* (Oxisols), used for validation of the model for density prediction. The descriptive analysis of the TS, clay and OC values are shown in table 4.

**Table 4.** Amplitude and descriptive analysis of data from 88 soil samples, 0 – 0.05 and 0.10 – 0.15 m depths, from a *Latossolo Amarelo* (Xanthic Oxisols), Flona Tapajós, Amazon.

Descriptive Analysis	TS	Clay	OC
	----- g kg <sup>-1</sup> -----		
Minimum	14	100	7.0
Median	30	780	20.3
Mean	118	727	25.3
Maximum	898	840	56.3

Each PTF generated the predicted values of density. Exchangeable potassium (K<sup>+</sup>) data in mg dm<sup>-3</sup> of *Flona Tapajós* samples show a range between 12 mg dm<sup>-3</sup> to 51 mg dm<sup>-3</sup> and a median of 27 mg dm<sup>-3</sup>. The conversion of the unit to mg kg<sup>-1</sup> was calculated by the ratio of the volumetric data (mg dm<sup>-3</sup>) and the predicted density of each PTFs. The RSE values for PTF1, PTF2, and PTF3, were respectively: 2.74 mg kg<sup>-1</sup>, 2.78 mg kg<sup>-1</sup> and 2.79 mg kg<sup>-1</sup>.

From the amplitude of the original data observed and the RSE obtained, PTF1 is the model that presents the best fit, corroborated by the lower values of RSE, followed by PTF2 and PTF3; although these two PTFs also presented low error values and can be used for conversion. Likewise, the graphs of the predicted vs. measured values (Figure 6) show a linear distribution of the values similar for all PTFs and high values of R<sup>2</sup>, corroborating the good application of the functions for data conversion.



**Figura 7.** Scatterplots of K<sup>+</sup> measured vs predicted data, using PTF1 (a), PTF2 (b) and PTF3 (c). Validation samples from Latossolo Amarelo (Xanthic Oxisols), Flona Tapajós (PA).

## 6 DISCUSSION (DISCUSSÃO)

As discussed by Mehlich (1972), the volumetric base data will only be equal to the gravimetric data if the fine earth density from the soil sample is precisely  $1.0 \text{ g dm}^{-3}$ , for other soils, it is necessary to convert units. Using the PTF1, the density from our data ranged from  $0.86$  to  $1.68 \text{ g cm}^{-3}$ , showing a soil mass variation within  $10 \text{ cm}^{-3}$  of soil.

The US Soil Survey Laboratory Methods Manual (SOIL SURVEY STAFF, 2014a) uses a fixed factor ( $1.45 \text{ g cm}^{-3}$ ) for the conversion of a volume estimate to a weight estimate of the bulk density for the fine earth, this means that no account is taken about the diversity of soil mass contained in a certain volume, which varies according to granulometry and the amount of organic carbon.

The use of PTF contributes to the standardization of chemical attribute units in a dataset or database, facilitating the conversion of units in the volumetric base to the gravimetric base or vice versa. In this sense, we used a dataset of soils with anthropic horizons, including data from literature with different units of the chemical attributes (unpublished data). This database was created to propose taxonomic criteria for the anthropic horizon in the Brazilian Soil Classification System – SiBCS (SANTOS et al., 2018) and the pretic horizon in the World Reference Base for Soil Resource – WRB (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015). Some of data sources compiled (CORRÊA, 2007; MARTINS et al, 2007; SOUZA, 2011; MACEDO, 2012; SILVA et al., 2013; MIRANDA, 2018; MACEDO et al., 2019) expressed chemical attributes of horizons on a volumetric basis (as it is recommended for fertility purposes, that takes composite soil samples), while others used gravimetric basis for the expression of the results (unit recommended for soil classification purposes). The conversion was essential to standardize the various chemical attribute data from the literature compiled in this database that had units on a volumetric basis.

Thus, for the dataset standardization, the best accuracy pedotransfer function obtained (i.e., PTF1) was applied to convert the calcium plus magnesium ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ) data from the volumetric to the gravimetric base. Table 5 shows the results of the conversion.

As shown in table 5, the largest differences between converted values (i.e., gravimetric basis) and the original values (i.e., volumetric basis) were found for samples with high total sand contents. It corroborates with the data that had a density prediction greater than  $1.0 \text{ g dm}^{-3}$  (Table 5). On the other hand, data with low total sand contents, such as IDs 3, 4, 5, 17, and 18 (Table 5), had a predicted density of approximately  $1.0 \text{ g dm}^{-3}$ , thus when applied the conversion of  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  data to gravimetric basis, there was practically no difference. Which was expected, since mathematically the closer is the density of the fine earth to  $1.0 \text{ g dm}^{-3}$ , the closer will be values of the chemical attributes in volumetric and gravimetric base. However, the predicted thin earth density will not always be equal or close to  $1.0 \text{ g dm}^{-3}$ , thus chemical attribute data on a volumetric basis differs from data on a gravimetric basis, requiring the functions to convert this data or a new measure. Therefore, the use of PTFs assists in the standardization of the database, which can later be used for various purposes, such as soil classification.

**Table 5.** Data from literature of calcium plus magnesium ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ) in the volumetric base converted to the gravimetric basis ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) through PTF1.

Data Identification (ID)	Author	Horizon	Layer (cm)	Total Sand	Predicted Density by PTF1	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ )	Converted $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ to $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$
1	Souza, 2011	Au	0 – 30	430	1.05741	28.4	26.8
2	Souza, 2011	Au	0 – 15	550	1.10628	2.2	1.9
3	Souza, 2011	Au	0 – 8	140	0.99630	38.8	38.9
4	Souza, 2011	A2u	8 – 20	160	0.99887	17.6	17.6
5	Souza, 2011	Abiu	20 – 60	120	0.99389	21.2	21.3
6	Silva, 2013	A1	0 – 18	503	1.08475	18.0	16.5
7	Silva, 2013	A2	18 – 28	490	1.07938	18.2	16.8
8	Martins et al. 2007	A1	0 – 12	810	1.31234	4.9	3.7
9	Martins et al. 2007	A2	12 – 35	830	1.33697	2.3	1.7
10	Miranda, 2018	Aup	0 – 5	562	1.11234	18.2	16.3
11	Miranda, 2018	A2u	5 – 20	519	1.09170	14.8	13.5
12	Miranda, 2018	A2u	12 – 60	367	1.03866	2.0	1.8
13	Miranda, 2018	A2u	5 – 20	680	1.18707	2.2	1.8
14	Miranda, 2018	A1u	0 – 12	517	1.09081	18.3	16.8
15	Miranda, 2018	A2u	12 – 54	549	1.10578	11.7	10.6
16	Miranda, 2018	A3u	54 – 64	458	1.06711	20.6	19.3
17	Miranda, 2018	Ap	0 – 10	131	0.99519	24.5	24.6
18	Miranda, 2018	2A3ub	60 – 100	130	0.99507	26.2	26.2

The main chemical attributes used as criteria for identification of pretic horizons in the WRB (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015) are exchangeable calcium and magnesium, available phosphorus, and organic carbon content. These attributes are expressed on a gravimetric basis – “exchangeable calcium plus magnesium content must be greater than 2.0  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  on thin earth, organic carbon content must be greater than or equal to 10  $\text{g kg}^{-1}$  and available phosphorus levels must be greater than or equal to 30  $\text{mg kg}^{-1}$  soil”. When applying to the soil samples with IDs 2, 9, 12, and 13,  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  values are greater than 2.0  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ . When the data is converted to the gravimetric base (the unit used in the WRB) the resulting

value decreases. Thus, according to WRB, after the conversion, these samples would not fit in the concept of a pretic horizon, since their  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  values are less than  $2.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

The same situation can be observed for the criteria for phosphorus in both WRB and SiBCS. Macedo et al. (2019), for example, evaluated chemical attributes of anthropic soils from naturally fertile floodplain areas of the Solimões River in the Brazilian Central Amazon. Phosphorus data were obtained on a volumetric basis (i.e.,  $\text{mg dm}^{-3}$ ) and the authors classified these soils according to WRB. In this work, specifically, the phosphorus data are very high and considerably exceed the WRB classification criterion (P above  $30 \text{ mg kg}^{-1}$  soil). However, if the phosphorus levels were near  $30 \text{ mg dm}^{-3}$ , the conversion of these data to the gravimetric basis would be paramount for the proper classification of the horizons. That is, for soil profile analysis and classification, it is recommended to obtain the data on a gravimetric basis, while the volumetric basis attributes are used for soil fertility purposes.

The use of PTF for standardization of the anthropic soil database was just one application example. It can be extended to other data standardization applications when access to samples is restricted or when the option to redo analyzes is impracticable to change the units of chemical attributes from volumetric base to gravimetric base or vice versa.

#### **- Simplified steps to the conversion of data**

A. Selection of available data: total sand, clay, or organic carbon.

B. Apply a chosen PTF:

- (i) Pedotransfer Function 1 (PTF1) using Total Sand, or;
- (ii) Pedotransfer Function 2 (PTF2) using Clay, or;
- (iii) Pedotransfer function 3 (PTF3) using Organic Carbon.

C. Divide the value of the attribute expressed in a volumetric basis, that is desired to convert, by the density predicted in the previous item, obtaining the value converted to gravimetric basis;

D. Alternatively, multiply the value of the attribute expressed on a gravimetric basis and to be converted to predicted density, obtaining the value converted to the volumetric basis.

## 7 CONCLUSIONS (CONCLUSÕES)

The pedotransfer functions obtained by nonlinear regressions, using the attributes: total sand, clay, or organic carbon as predictor variables, allowed the conversion of soil chemical attributes obtained in the gravimetric base to the volumetric base and vice versa. The pedotransfer function that presented the best precision to predict the fine earth density, which is essential for data conversion, is the one with total sand as a predictor (PTF1), presenting the smallest RSE of  $0.092 \text{ g cm}^{-3}$ .

The proposed pedotransfer functions can be used to standardize soil datasets or databases and convert chemical soil data expressed in different units.

This paper also highlights the importance of using the proper method of taking fine earth samples (either by weighing or by using the volumetric device) for laboratory analysis.

The selection of samples for elaboration of the functions did not cover all of Brazilian territory. Thus, a proposal for future work is to expand the selection to validate the PTFs in other regions and for all mineral soil orders.

## **CAPÍTULO II**

### **CRITÉRIOS TAXONÔMICOS PARA CLASSIFICAÇÃO DO HORIZONTE ANTRÓPICO NO SiBCS E *PRETIC* NO WRB**

## 1 RESUMO

Os horizontes diagnósticos superficiais A antrópico (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS) e *Pretic* (World Reference Base for Soil Resource - WRB) identificam solos de origem antrópica relatados principalmente na Amazônia, denominados Terra Preta de Índio (TPI). Eles diferem dos solos não antrópicos adjacentes pela presença de artefatos, cores escuras, maior estoque de carbono e fertilidade natural. Os critérios quantitativos atuais do SiBCS para o horizonte A Antrópico necessitam de validação e os critérios do *Pretic* no WRB estão restringindo a classificação das TPIs. Dessa forma, os objetivos deste trabalho foram identificar padrões, validar e propor critérios taxonômicos quantitativos para os horizontes A Antrópico do SiBCS e *Pretic horizon* do WRB, buscando compatibilizar os sistemas e com a reclassificação dos horizontes e perfis, com base na nova proposta. Um conjunto de literatura no Brasil, com 104 perfis identificados como TPI, mas não necessariamente adequados ao SiBCS e WRB, foi montado em um conjunto de dados, com a sua morfologia, atributos físicos e químicos, totalizando 281 sub-horizontes. Os requisitos qualitativos (artefatos, ossos e carvão vegetal) e os quantitativos (teor de Fósforo Mehlich1  $\geq 30 \text{ mg kg}^{-1}$  e espessura combinada do horizonte A antrópico e o correspondente *Pretic*  $\geq 20 \text{ cm}$ ) vigentes para definir as TPIs foram mantidos. Sendo propostos os seguintes critérios e alterações em definições: carbono orgânico  $\geq 0,6\%$  ou  $6,0 \text{ g kg}^{-1}$ ; cor de Munsell de valor  $\leq 4$  e croma  $\leq 3$ ; sendo que a espessura combinada dos horizontes A antrópicos ou *Pretic*  $\geq 20 \text{ cm}$  é medida de forma contínua a partir da superfície mineral ou incluindo sub-horizontes Au enterrados. Com base nessa proposta, os 104 perfis foram reclassificados, obtendo-se um incremento de cerca de 45% de horizontes antrópicos, que antes não eram classificados como antrópicos. Além disso, o WRB requer uma espessura combinada de pelo menos 50 cm, dentro dos primeiros 100 cm da superfície, para identificar os *Pretic Anthrosols*, que foram atendidos por apenas 41% dos perfis do conjunto de dados. Assim, propõe-se diminuir a espessura do horizonte *Pretic*, de 50 para 30 cm, e usar uma seção de controle mais profunda (até 150 cm), para incluir horizontes antrópicos enterrados observados nas paisagens sedimentares da Amazônia. Com essa alteração, 81% dos perfis no conjunto de dados se encaixariam nos *Pretic Anthrosols*.

**Palavras-chave:** A antrópico. *Pretic Horizon*. Classificação de solos.

## 2 ABSTRACT

The surface diagnostic Anthropogenic horizon (Brazilian Soil Classification System - SiBCS) and the Pretic (World Reference Base for Soil Resource - WRB) identify soils of anthropic origin reported mainly in the Amazon region, called Amazonian Dark Earths (ADE). They differ from adjacent non-anthropogenic soils by presence of artifacts, dark colors, higher carbon stocks and natural fertility. Current SiBCS quantitative criteria for the Anthropogenic A horizon needs validation, and Pretic criteria in WRB is restringing classification of ADEs. Thus, the objectives of this work were to establish patterns, validate and propose quantitative taxonomic criteria for the SiBCS Anthropogenic A horizon and the WRB Pretic horizon, seeking the compatibility of the systems and to review the classification of the horizons and profiles, based on the new proposal. A collection of studies in Brazil, with 104 profiles identified as ADEs but not necessarily fitting SiBCS and WRB, was assembled in a dataset, with their morphology, physical and chemical attributes, totaling 281 sub-horizons. The current qualitative (artifacts, bones, and charcoal) and quantitative (Mehlich1 Phosphorus content  $\geq 30 \text{ mg kg}^{-1}$  and combined thickness of A anthropic or the corresponding Pretic horizons  $\geq 20 \text{ cm}$ ) requirements to define the TPIs were maintained. The proposed criteria and changes in definitions are: organic carbon  $\geq 0.6\%$  or  $6.0 \text{ g kg}^{-1}$ ; Munsell color value  $\leq 4$  and chroma  $\leq 3$ ; the combined thickness of the A anthropic or Pretic horizons  $\geq 20 \text{ cm}$  is measured continuously from the mineral surface or including buried Au sub-horizons. Based on this proposal, the 104 profiles were reclassified, resulting in an increase of about 45% in anthropic horizons, which were not previously classified in this way. Also, WRB requires a combined thickness of at least 50 cm, within the first 100 cm from the surface, to identify the Pretic Anthrosols, which was met by only 41% of dataset profiles. Thus, it is proposed to decrease the thickness of Pretic horizon, from 50 to 30 cm, and to use a control section up to 150 cm, to include buried anthropic horizons found in the Amazon sedimentary landscapes. With this change, 81% of profiles in the dataset would fit the Pretic Anthrosols.

**Keywords:** *A antrópico*. Pretic Horizon. Soil classification.

### 3 INTRODUÇÃO

A ação dos fatores clima, relevo e organismos sobre um determinado material de origem e por certo período (JENNY, 1994), associada aos processos pedogenéticos de adições, perdas, transformações e translocações (SIMONSON, 1959), é responsável pela formação dos tipos de solos. Em decorrência dessa pedogênese, os solos apresentam características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas. Através do agrupamento e classificação dos diversos tipos de solos, podemos estudar melhor suas propriedades e funções e a relação com a paisagem. Para tal, foram elaborados em diversos países sistemas de classificação de solos, como por exemplo: o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (SANTOS et al., 2018); o *Chinese Soil Taxonomy* (COOPERATIVE RESEARCH GROUP ON CHINESE SOIL TAXONOMY et al., 2001); *The Australian Soil Classification* (ISBELL; THE NATIONAL COMMITTEE ON SOIL AND TERRAIN, 2016). Sendo que, o *World Reference Base for Soil Resources - WRB* (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015), desenvolvido originalmente pela FAO para a legenda de mapas de solos do mundo, e o *Soil Taxonomy* nos EUA (SOIL SURVEY STAFF, 2014b) são considerados pela União Internacional de Ciências do Solo (IUSS) como sistemas internacionais.

No Brasil, o SiBCS é continuamente aperfeiçoado e validado, com a revisão de atributos e critérios diagnósticos, horizontes diagnósticos, definição e composição das classes em todos os níveis categóricos. A primeira edição do SiBCS foi publicada em 1999, seguida da segunda em 2006, terceira em 2013 e a quarta (publicação digitalizada, com mínima revisão) em 2018, seguida da quinta, versão atual, também publicada no ano de 2018 (SANTOS et al., 2018).

O SiBCS é um sistema de classificação taxonômico hierárquico, partindo de níveis mais gerais para níveis de maior especificidade. O primeiro nível categórico, também chamado de ordem, abrange 13 classes de solos: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Espodossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos, Nitossolos, Organossolos, Planossolos, Plintossolos e Vertissolos. Essas classes são diferenciadas a partir da presença ou ausência de determinados atributos, horizontes diagnósticos ou propriedades, que foram desenvolvidos a partir dos processos pedogenéticos dominantes e podem, em geral, ser identificadas em campo (SANTOS et al., 2018). Segundo os mesmos autores, o segundo nível categórico, subordem, representa “a ação de outros processos pedogenéticos que ocorreram em conjunto com o processo dominante que determinou a ordem, ou representam atributos diagnósticos diferenciais resultantes da gênese do solo que tenham alguma potencialidade de uso”. Já o terceiro nível categórico, chamado de grandes grupos, representa “as características do solo relacionados aos tipos e arranjos dos horizontes do solo, à atividade da fração argila, as condições de saturação do complexo sortivo por bases, alumínio ou sódio, ou pela presença de sais solúveis; além de propriedades que restrinjam o desenvolvimento das raízes ou o movimento da água no solo” (SANTOS et al., 2018). O quarto nível categórico ou também conhecido como subgrupo, possui suas classes separadas em três grupos: (i) típico, que representam o conceito central das classe ou o indivíduo mais simples; (ii) intermediários, para o 1º, 2º ou 3º nível categórico; e (iii) extraordinários, que representam os solos com características extraordinárias (SANTOS et al., 2018).

Os diferentes sistemas de classificação utilizam as informações referentes aos atributos dos solos, características do material de origem, a condição do solo na paisagem e mesmo condição climática, de formas distintas. A definição de critérios quantitativos, com limites definidos, é tema preponderante na divisão ou estabelecimento de novas classes de solos nos diversos níveis taxonômicos. Assim, os sistemas de classificação de solos estão sempre sendo aprimorados conforme novos estudos de solos vão sendo desenvolvidos.

Na região amazônica, solos identificados como Terra Preta de Índio (TPI) ou *Amazonian Dark Earths* (em inglês), apresentam como horizonte diagnóstico superficial o A antrópico, definido no SiBCS, na edição de 2013, como “*caracterizado pela intervenção humana em tempos anteriores, através da deposição de fragmentos de cerâmicas, artefatos líticos, restos de ossos, conchas e restos de alimentos nos solos ocupados por esses povos*” (SANTOS et al., 2013). Embora identificado desde a primeira edição do SiBCS (1999), a definição deste horizonte foi ligeiramente modificada em edições seguintes, contudo os critérios taxonômicos são ainda predominantemente qualitativos. O que dificulta a caracterização e classificação do horizonte, pela sua subjetividade, isto é, pode variar em função da experiência e do olhar do avaliador.

Na edição mais recente do SiBCS (SANTOS et al., 2018) a conceituação do horizonte superficial A antrópico foi revisada, inserindo novos critérios taxonômicos quantitativos, que ainda se encontram em fase de validação. Esses critérios têm como base proposta apresentada por Cordeiro et al. (2017a) e estabelecem valores de espessura e teor de fósforo mínimos. Assim, o horizonte antrópico, segundo Santos et al. (2018), além da presença obrigatória de artefatos líticos, cerâmicas, restos de ossos, conchas e alimentos, ou vestígios de ação do fogo como a presença de carvão e cinzas, deve possuir as seguintes características:

- i) *Espessura maior ou igual a 20 cm; e*
- ii) *Teor de fósforo extraível (com solução Mehlich-1) maior ou igual a 30 mg kg<sup>-1</sup>.*

Na estrutura do SiBCS, a presença do horizonte A antrópico não caracteriza uma dada classe em primeiro nível categórico (ordem). O caráter antrópico (i.e., identificado pela presença de horizonte A Antrópico) é destacado no SiBCS apenas no 4º ou 5º nível categórico. Portanto, diferentes classes de solos no Brasil podem ser identificadas como TPI, isto é, apresentam o horizonte diagnóstico superficial A antrópico. Na literatura que compõe a base de dados confeccionada para este estudo foram encontrados horizontes A antrópicos nas seguintes classes: Argissolos, Latossolos, Cambissolos, Neossolos, Gleissolos, Espodossolos e Plintossolos.

Os solos da Amazônia identificados pela influência antrópica na sua formação despertam o interesse de cientistas do solo do mundo inteiro, por sua elevada fertilidade e pelas características intrínsecas a sua matéria orgânica, tais como a elevada estabilidade e quantidades de cargas da superfície. Solos identificados como TPI, ou *Amazonian Dark Earth (ADE)*, apresentam classificação específica no *World Reference Base for Soil Resources (WRB)* (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015).

O WRB foi desenvolvido por grupo de trabalho, da FAO e depois da IUSS, tendo como base a publicação *Legend* (FAO-UNESCO, 1974) e *Revised Legend* (FAO, 1988) para o Mapa Mundial de Solos (FAO-UNESCO, 1971 - 1981). A primeira edição do WRB, na sua estrutura

atual, foi lançada em 1998, no XVI Congresso Mundial de Ciência do Solo em Montpellier, França. A segunda edição foi lançada em 2006, também em Congresso Mundial de Ciência do Solo que ocorreu na Filadélfia, EUA. Depois de oito anos de testes e trabalhos intensivos nas coleções de dados de solos mundiais e viagens a campo exclusivamente para validação do WRB, no ano de 2014, foi lançada a última edição do WRB, com revisão e pequenas alterações em 2015 (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015).

Diferente do SiBCS, que é um sistema hierárquico com quatro níveis diferenciados através de uma chave taxonômica, o WRB agrupa os tipos de solos em dois níveis categóricos. No primeiro nível categórico são apresentados 32 grupos de solos de referência, definidos de acordo com as características dominantes, isto é, levam em consideração os fatores (i.e., clima, relevo, organismos, material de origem e tempo) e processos (i.e., adições, perdas, transformações e translocações) de formação dos solos. O segundo nível diferencia (i) os qualificadores principais, que são as características específicas adicionais ao grupo do primeiro nível escolhido, apresentados em ordem de importância; e (ii) os qualificadores suplementares, que são as características mais específicas do solo, listados em ordem alfabética e não em ordem de importância (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015).

No WRB, os solos de influência antrópica por um intenso e longo período de uso com agricultura são identificados no grupo *Anthrosols* (primeiro nível). Para ser classificado como *Anthrosols*, o solo deve apresentar horizontes que marcam a influência antrópica com espessuras maiores ou iguais a 50 cm. A descrição simplificada desses horizontes minerais, de acordo com o WRB (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015), é apresentada a seguir (versão do autor):

- *anthraquic* – em solos de tabuleiros de arroz, a camada que é saturada com água e a compactada pelo cultivo, ambas mostram uma matriz reduzida e canais de raízes oxidados;
- *hydragric* – em solos de tabuleiros de arroz, a camada abaixo do horizonte *anthraquic* mostra características redoximórficas e/ou acumulação de Fe e /ou Mn;
- *hortic* – horizontes escuros, alto conteúdo de matéria orgânica e P, elevada atividade animal, alta saturação por bases; resultam de cultivo por um longo tempo, com adubação e aplicação de resíduos orgânicos;
- *irragric* – horizontes de estrutura uniforme, conteúdo de matéria orgânica ao menos moderado, elevada atividade animal; gradualmente construídos pela adição de água para irrigação rica em sedimentos;
- *plaggic* – horizontes escuros, conteúdo de matéria orgânica ao menos moderado, classe de textura arenosa ou média; resultam da aplicação de gramas e excrementos;
- *pretic* – escuro, alto conteúdo de matéria orgânica e P, baixa atividade animal, altos teores de Ca e Mg extraíveis, com remanescentes de carvão e /ou artefatos; incluem as *Amazonian Dark Earths*;
- *terric* – mostram coloração relacionada ao material fonte, alta saturação por bases; resultam da adição de material mineral (com ou sem resíduos orgânicos) e cultivo intenso.

No caso da presença do horizonte *pre tic*, o solo apenas será classificado como Anthrosol se o horizonte apresentar uma espessura superior a 50 cm dentro dos primeiros 100 cm de solo. Na versão atual do WRB (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015), o *Pretic horizon* é citado como um horizonte mineral superficial formado por atividades humanas em período pré-colombiano, incluindo a adição de carvões, cujas características são preservadas mesmo em ambiente tropical úmido, sendo os solos, em geral, de baixa atividade de argila. Apresentam como evidência de atividades antrópicas a “*presença de artefatos (fragmentos de cerâmica, artefatos líticos, ossos ou conchas modificadas como ferramentas)*”. Os critérios diagnósticos, qualitativos e quantitativos, que definem este horizonte no WRB são:

“O *Pretic* é um horizonte superficial que consiste em material mineral e tem:

i) cor Munsell com valor menor ou igual a 4 e croma menor ou igual a 3, ambos úmidos;

e

ii) teor de carbono orgânico maior ou igual a 1%; e

iii) teores de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  trocáveis (método, 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$ , pH 7) maiores ou iguais a  $2,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  em terra fina; e

iv) teor de P extraível (Mehlich 1) maior ou igual a  $30 \text{ mg kg}^{-1}$ ; e

v) um ou mais dos seguintes subitens:

v.1. teor maior ou igual a 1% de artefatos (por volume, média ponderada); **ou**

v.2. teor maior ou igual a 1% de carvão (por volume, média ponderada); **ou**

v.3. evidências de ocupação humana no passado, na paisagem ao redor, ex. construções, hortas, sambaquis ou geoglifos; e

vi) menos de 25% (volume, média ponderada) de poros devidos à ação de animais, coprolitos ou outras evidências de atividade animal no solo; e

vii) uma ou mais camadas com espessura combinada de pelo menos 20 cm (versão do autor).

Uma observação importante é que o *Pretic horizon* foi criado no WRB para diferenciar os solos antrópicos da Amazônia (TPI) de solos com influência antrópica em outras regiões do mundo. Apesar do WRB contar com diversos critérios quantitativos para o *Pretic horizon* e *Anthrosols*, de acordo com estudo de Cordeiro et al. (2017b), no Brasil são excluídos cerca de 68% e 79% dos horizontes e perfis, respectivamente, registrados na literatura como TPI (ADE). Assim, mais da metade das TPIs não estão adequadamente classificadas no WRB.

Dessa forma, partiu-se do pressuposto de que os critérios quantitativos atuais para os horizontes diagnósticos superficiais antrópicos do SiBCS e do WRB restringem a classificação de solos identificados como TPI, para propor o estudo das variações das características morfológicas, químicas e físicas de horizontes desses solos, através de compilação e exame de banco de dados. Dessa forma, os objetivos deste trabalho foram avaliar padrões, validar e propor critérios taxonômicos quantitativos para os horizontes A Antrópico do SiBCS e *Pretic horizon* do WRB, buscando compatibilizar os sistemas e com a reclassificação dos horizontes e perfis, com base na nova proposta.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Compilação dos dados

Dados secundários de TPI foram usados para estabelecer padrões e propor a revisão de critérios qualitativos e quantitativos (valores limites) dos horizontes diagnósticos A Antrópico (SiBCS) e *Pretic* (WRB), considerando principalmente as características ou atributos postulados como fundamentais para identificar esses horizontes, tais como espessura, teores de bases trocáveis, P e Corg.

Para o levantamento de dados da literatura, em primeiro lugar, termos principais foram definidos para a busca, tais como: Terra Preta de Índio, Solos da Amazônia, Solos Antrópicos, Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, Horizonte A antrópico, *World Reference Base for Soil Resources* (WRB), *Pretic horizon*, classificação de solos, *Amazonian Dark Earth* (ADE), Ocupação Humana Pré-Histórica, População Pré-Colombiana, *Anthrosols*, Atributos de Solos Antrópicos, *Black Carbon*, *Carbon Stok*, Pedoarqueologia, Antropogênese, Perfil de Solos Antrópicos e Assentamentos Pré-Colombianos. A seguir, foi feita uma pesquisa utilizando catálogos de bibliotecas, resumos e resenhas, índices de citações, bibliografias, sites e periódicos nacionais e internacionais. A pesquisa se restringiu a publicações em português e inglês, no período entre 1970 e 2019.

A pesquisa na Web foi realizada usando os sites: *Google Scholar*, Portal de Periódicos CAPES, *Science Direct*, *Springerlink*, *SciELO*, ERIC, *Science.gov* e *ScienceResearch*. Para cada site, foram incluídos os itens: teses, trabalhos científicos, livros, capítulos de livros, resenhas e relatórios. Os textos foram identificados em três categorias: i) documentos com dados de perfis de TPI, ou seja, todas as publicações que apresentam os dados de atributos físicos, químicos e morfológicos de solos com horizonte A antrópico, que foram usados para a construção da base de dados; ii) documentos relacionados sem dados, ou seja, as publicações que apresentam literatura importante para a revisão de literatura deste trabalho, porém não apresentam dados de perfis; e iii) documentos de importância restrita, ou seja, as publicações sobre as TPI na Amazônia, porém excluídas por não possuírem dados ou por abordarem temas não relevantes para a presente discussão. Finalmente, uma lista de 84 referências principais foi obtida.

A partir dos trabalhos identificados na categoria (i) (i.e., 23 trabalhos com diversos perfis de TPI) foi elaborada planilha eletrônica com as seguintes informações dos perfis: descrição geral, descrição morfológica, dados físicos, dados químicos e mineralogia. A descrição geral foi composta por localização, latitude e longitude, situação, declive, cobertura vegetal, elevação, litologia, formação geológica, cronologia, material originário, relevo local, relevo regional, erosão, drenagem, vegetação primária, uso atual e clima. A descrição morfológica foi composta de: sequência de horizontes, profundidades iniciais e finais dos horizontes, cor, classe textural, estrutura, consistências seca, úmida e molhada. Nos dados físicos a base de dados foi composta de: granulometria (areia grossa, areia fina, silte e argila), argila dispersa em água, grau de floculação, relação silte/argila, densidade do solo, densidade das partículas e porosidade. Os dados químicos compilados foram pH (água e KCl), complexo sortivo ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$ ), P (Mehlich 1), carbono orgânico (Corg.) e nitrogênio (N). Por fim, foram compilados dados relacionados ao complexo sortivo e indicadores da mineralogia: ataque

sulfúrico (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO), Ki, Kr, Fe e Al extraídos por oxalato ácido de amônio e ditionito-citrato-bicarbonato; nesse caso, vários perfis têm dados incompletos.

Não foram compilados dados de solos obtidos de amostragens em camadas, apenas de perfis com descrição e coleta de horizontes. Ainda, os dados analíticos foram verificados quanto à metodologia, isto é, foram desconsiderados trabalhos usando métodos distintos dos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo (TEIXEIRA et al., 2017a) e versões anteriores dessa publicação, bem como análises de fósforo por outros métodos que não o Melich 1.

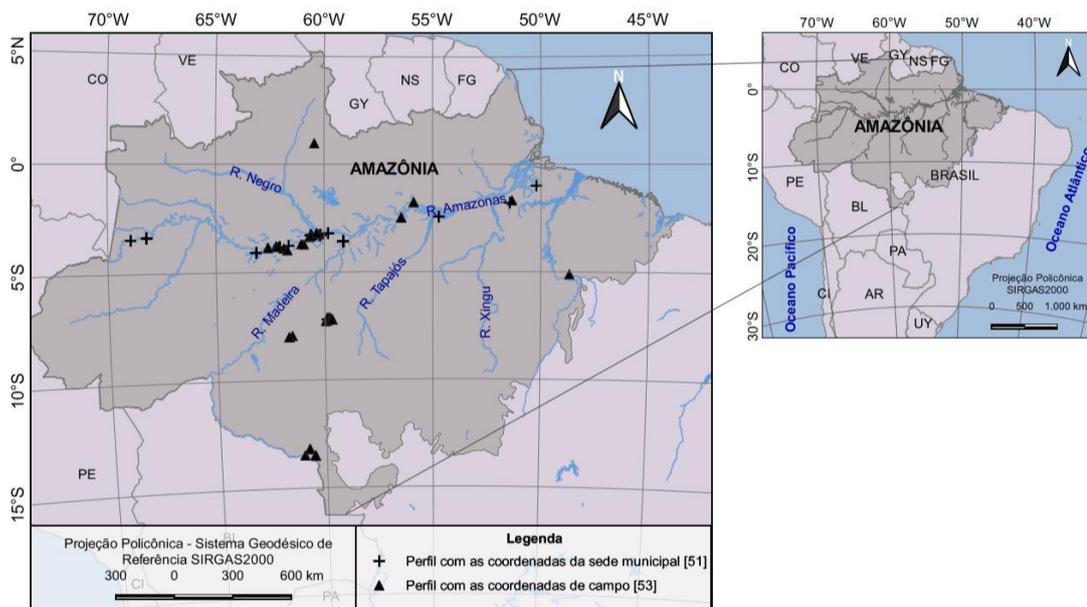
Nesta etapa do trabalho foi identificado que os dados químicos de diferentes fontes bibliográficas possuíam unidades diferentes para o mesmo atributo, isto é, dados em base volumétrica (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e em base gravimétrica (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>). Como explicado no primeiro capítulo, isso decorre do uso de metodologias diferentes na preparação da amostra para a análise química. Isto é, tem-se a unidade em base volumétrica quando se utiliza um volume conhecido de terra fina seca ao ar (TFSA), que geralmente é de 10 cm<sup>3</sup> para as análises químicas; ou tem-se as unidades em base gravimétrica quando utiliza-se uma massa de 10 g de TFSA no preparo da amostra para as análises. Dessa forma, foi necessário padronizar as unidades da base de dados para posterior avaliação, o que levou ao uso das funções de pedotransferência desenvolvidas no primeiro capítulo. Além disso, também foi necessária a padronização de unidades de medidas adotadas para a análise de dados, principalmente de % para g kg<sup>-1</sup>, de meq por 100 ml para cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, estas feitas a partir da conversão direta de unidades.

## 4.2 Avaliação dos dados

Foram compilados 104 perfis de solos identificados como antrópicos descritos na região Amazônica brasileira, totalizando 281 horizontes A antrópicos. Do total de perfis, 88 estão localizados no estado do Amazonas; 08 no Pará; 07 em Rondônia e um 01 em Roraima. O mapa apresentado na figura 8 mostra a localização dos perfis compilados no limite do território brasileiro. Para a elaboração do mapa foi utilizado o *software* livre de Sistemas de Informações Geográficas chamado QGIS – versão 3.12 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2020). O mapa gerado está no sistema de referência geodésico SIRGAS2000 e para sua confecção foi utilizado o arquivo *shapefile* referente ao mapa de Biomas do Brasil na escala de 1:250000 (IBGE, 2019). Também foi utilizado o arquivo *shapefile* referente aos países da América do Sul da base cartográfica contínua 1:1.000.000, disponível na base de dados do IBGE (IBGE, 2019). A partir das informações de latitude e longitude (Anexo I) foi gerado um arquivo *shapefile* com a distribuição dos perfis de TPI compilados na base de dados. Do total de perfis compilados, cerca de 49% não tinham identificação de coordenadas na descrição de campo; portanto foram utilizadas coordenadas aproximadas conforme a localização do município onde se encontra o perfil, sendo identificados no mapa como: perfil com as coordenadas da sede municipal.

A partir da base de dados de solos identificados como TPI foram selecionados os horizontes A antrópicos. Posteriormente, foram selecionados os atributos que, de acordo com a literatura, mais caracterizam as TPI, quais sejam: espessura do horizonte A; cor; pH, teores de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (Valor V), P e Corg. As avaliações dos dados e padrões de distribuição dos atributos dos perfis com horizonte A antrópico foram feitas por meio de dispersão simples dos dados (tendência e

amplitude) e de medidas de tendência central (média, moda ou mediana) e/ou na distribuição de frequências, com análises para a identificação dos valores limites desses horizontes, além do uso de gráficos de *boxplot* (TUKEY, 1977) para visualização da variação dos atributos.



**Figura 8.** Mapa da distribuição dos perfis de TPI na região Amazônica brasileira.

Os *boxplots* agrupam um conjunto de cinco análises estatísticas básicas. O retângulo do *boxplot* representa o intervalo interquartílico (IQR), que é a diferença entre o percentil 75% (Q3) ou também conhecido como terceiro quartil, e o percentil 25% (Q1) ou primeiro quartil. A linha horizontal dentro do retângulo representa a mediana, também conhecida como percentil 50%. As linhas verticais fora do retângulo representam os valores máximos e mínimos dentro do intervalo definido pelo critério de Tukey, no qual excluem-se valores atípicos chamados de *outliers*. Esse intervalo entre máximo e mínimo (excluindo os *outliers*) é definido através do IQR, no qual o valor mínimo =  $Q1 - (1,5 \cdot IQR)$ ; e o valor máximo =  $Q3 + (1,5 \cdot IQR)$ . Os *outliers* são representados por pontos (COLEMAN, 2015; TUKEY, 1977). Todas as análises foram feitas com o programa R (R CORE TEAM, 2013). Foi usado o pacote Algoritmos para Pedologia Quantitativa (AQP, *Algorithm for Quantitative Pedology*) desenvolvido por Beaudette et al. (2011), também no programa R (R CORE TEAM, 2013), para representar e avaliar a variação em profundidade dos atributos cor e espessura.

Com suporte estatístico, os valores limites para os atributos foram identificados quanto à sua importância para classificação dos solos. Depois, os critérios atuais dos sistemas SiBCS e WRB foram validados e novos critérios propostos, sendo apresentados em forma de texto conforme as normas e regras dos sistemas. Os 104 perfis no banco de dados foram classificados, quanto a presença do A Antrópico ou *Pretic horizon* e Anthrosols, conforme critérios atuais no SiBCS e no WRB, e depois reclassificados segundo critérios propostos nesta dissertação. As porcentagens de perfis com horizonte A Antrópico e *Pretic* foram comparadas, quando usados os critérios atuais e segundo a proposta, para o SiBCS e o WRB, respectivamente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Espessura e cor dos horizontes antrópicos

Nos 104 perfis compilados, a espessura mínima dos horizontes identificados como A antrópicos (incluindo os horizontes transicionais, tais como AB e AC) foi de 8 cm e a espessura máxima foi de 200 cm. A média da espessura foi de aproximadamente 59 cm, com um desvio padrão de 32 cm, e a mediana foi de 55 cm. Apesar de muitos horizontes avaliados neste estudo possuírem uma grande espessura, passando dos 100 cm. Os valores da mediana e da média se encontram dentro da variação apresentada nos estudos de Kern et al. (2003), que mostrou que a maioria das TPI tem espessura entre 30 e 60 cm.

O horizonte A antrópico era definido apenas por critérios qualitativos até a quarta edição do SiBCS (SANTOS et al., 2013). Isto é, não se considerava um limite de espessura, sendo, porém, descritos como horizontes muito espessos. A partir da última edição do SiBCS (SANTOS et al., 2018) o critério quantitativo de espessura maior ou igual a 20 cm foi incorporado, com base em proposta do trabalho de Cordeiro et al (2017a), mas é apontada no SiBCS a necessidade de validação.

Neste estudo, dentre o total de perfis avaliados com dados de espessura (i.e., 104) apenas 3 tiveram espessuras do horizonte antrópico menores que 20 cm, tendo estes os valores de 8, 15 e 19 cm. O solo com o horizonte antrópico de 8 cm é um Neossolo Flúvico e o horizonte antrópico está enterrado, ocorrendo em ambiente de várzea no município de Coarí, AM (perfil 15, Sítio Lauro Sodré II), sendo que o autor (SOUZA, 2011b) identificou o processo de pedobioturbação e registra frequentes inundações ao longo do tempo, promovendo a deposição de sedimentos de várias classes texturais, com camadas/horizontes sem relação pedogenéticas entre elas. Essas condições (i.e., pedobioturbação e as inundações) podem ter levado à redução da espessura do horizonte antrópico. O mesmo processo foi identificado no solo com apenas 15 cm de espessura deste horizonte, por Miranda (2018), em Cambissolo Flúvico, também em várzea e sob floresta não alterada (perfil 1, São Paulo de Olivença – AM).

O horizonte antrópico de 19 cm ocorre em Argissolo Amarelo Distrófico, situado em topo de paisagem com lavoura de café de em média 10 anos, no município de Apuí, AM (AQUINO et al., 2016). O uso agrícola, mesmo sendo uma lavoura perene e, portanto, com cultivo menos intensivo, pode ter levado a redução da espessura do horizonte antrópico ao longo dos anos, sobretudo pela erosão da camada superficial. No entanto, as características indicativas de elevada fertilidade permanecem marcantes nesse perfil.

Portanto, excluindo os perfis acima citados, cerca de 97% dos perfis compilados apresentam espessura do horizonte antrópico maior ou igual a 20 cm. Esses resultados corroboram e validam o critério de espessura mínima proposto por Cordeiro et al. (2017a) e adotado no SiBCS. O valor maior ou igual a 20 cm é coincidente com o critério de espessura mínima para o *Pretic horizon* no WRB.

As maiores espessuras observadas dentre os solos com horizonte antrópico no acervo foram de 130, 160 e 200 cm. O perfil que apresenta 130 cm de horizonte antrópico situa-se em área plana à margem do Rio Trombetas no município de Oriximiná, PA (perfil 1) (KERN; KÄMPF, 1989). Segundo às informações dos autores, na época da amostragem, este perfil havia

sido submetido ao uso agrícola extrativista, porém estava em processo de revegetação com floresta secundária. O perfil com espessura de 160 cm, um Neossolo Quartzarênico, foi identificado por Corrêa (2007) em área de terra firme à margem do Rio Negro, AM, sem informação de uso. A maior espessura de horizonte antrópico foi a de 200 cm, em Neossolo Flúvico descrito por Souza (2011b), no município de Iranduba, AM (Sítio Cavalcante, perfil 4). O autor registra que o perfil está localizado na borda de dique aluvial do Rio Solimões e que a dinâmica do rio vem causando a erosão de boa parte do sítio. Mesmo assim, a espessura do horizonte antrópico nesse sítio foi expressiva, indicando que a sua ocupação por povos pré-Colombianos foi intensa.

Vale ainda destacar que dentre os 104 perfis compilados, 15 apresentam o horizonte A antrópico enterrado, ou seja, outros horizontes foram formados a partir de material depositado acima do A antrópico ou ainda são modificados a partir deste, devido ao longo tempo em que ele se formou. Dessa forma, não necessariamente o horizonte A antrópico e o *Pretic* são horizontes superficiais, como definido atualmente, tanto no SiBCS quanto no WRB. Assim, propõem-se que a definição desses horizontes contemple texto indicando que podem ou não estar na superfície do solo.

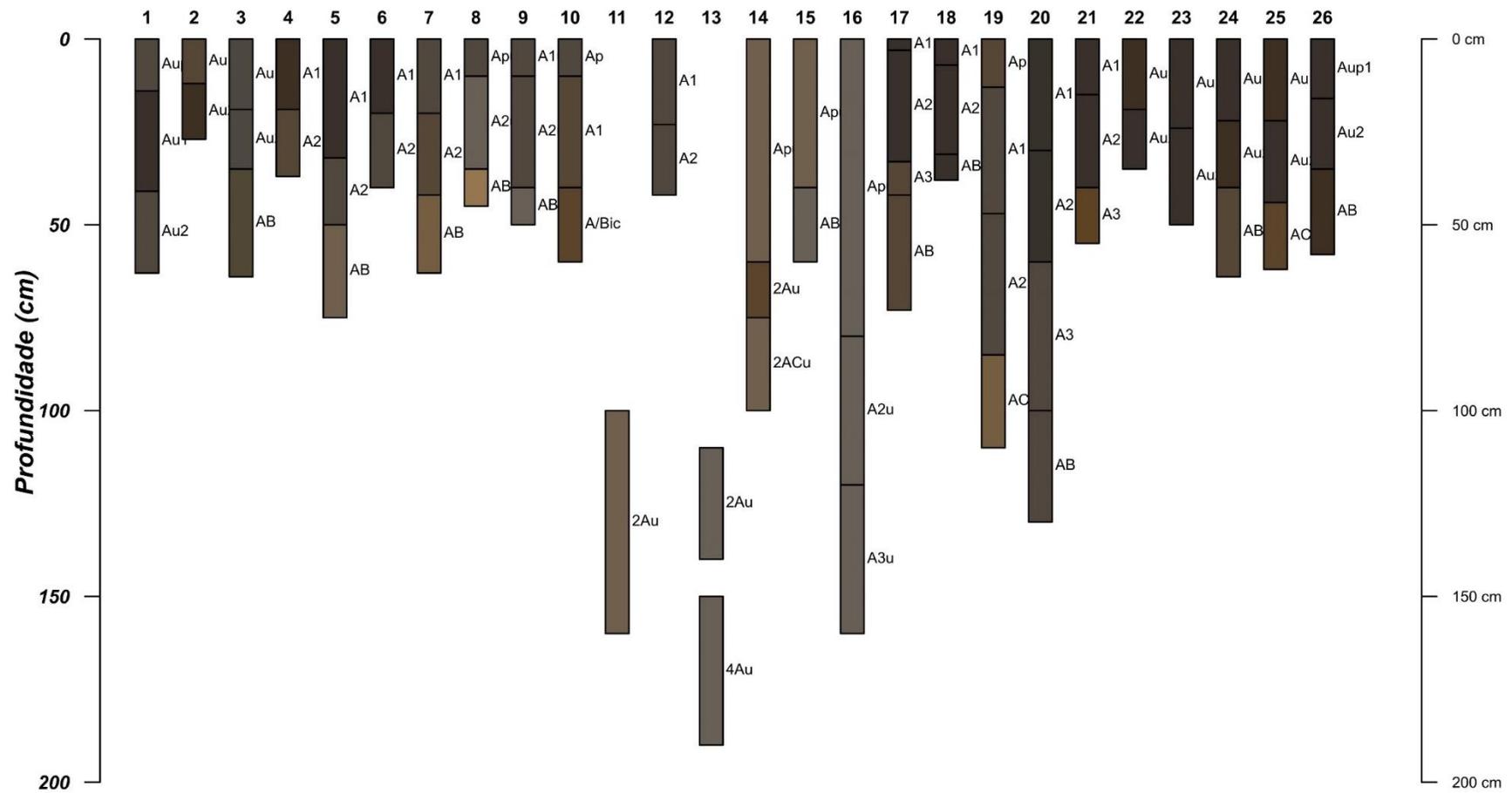
No que se refere à cor das TPI, de 104 perfis compilados apenas 4 não apresentaram dados de cor. As descrições dos perfis compilados, nos horizontes identificados como A antrópicos, seguem a classificação de cores segundo a Carta de Cores de Munsell, variando entre os matizes 2,5YR a 5Y. Os resultados mostraram maior participação do amarelo que do vermelho, sendo que 17% dos horizontes avaliados tiveram o matiz 7,5YR, 75% tiveram matiz 10YR, cerca de 2% tiveram matiz de 2,5Y e 5Y e 6% com matizes menores ou iguais a 5YR. De um total de 281 horizontes A antrópicos compilados, 25 não apresentaram informação de cor. O valor e croma das cores dos horizontes avaliados variou bastante, com predomínio de valor  $\leq 4$  (i.e., 92% dos horizontes) e croma  $\leq 3$  (i.e., 94% dos horizontes).

Esses resultados de predomínio de valor e croma baixos são consistentes com a identificação do horizonte antrópico, que é caracterizado pela cor escura, e também reflete os altos teores de matéria orgânica. O acúmulo de matéria orgânica nos solos pelos povos pré-colombianos, a elevada concentração de carbono orgânico e o uso do fogo provocou a transformação de biomassa orgânica em carvão vegetal (*black carbon*), isto é, carbono de origem pirogênica (CUNHA et al., 2009b; GLASER; AMELUNG, 2003; TEIXEIRA et al., 2009). Essas formas de carbono são recalcitrantes no solo e possuem propriedade pigmentante, por isso as TPI apresentam, geralmente cores mais escuras (LIANG et al., 2006). Os horizontes antrópicos com valor e croma mais altos, ou seja, cores mais claras, podem ser devidos a áreas com menor quantidade do carbono pirogênico e podem ser evidências do menor uso do fogo pelos povos ou sítios de ocupações temporárias (LIANG et al., 2006).

A representação visual da cor (segundo as cores da carta de Munsell) e a espessura dos horizontes antrópicos são apresentadas nas Figuras 9, 10, 11 e 12. Os horizontes sem coloração (em branco) são aqueles nos quais não havia descrição de cor para o perfil e, além disso não estão apresentadas a espessura total do perfil de solo examinado, apenas dos horizontes A.

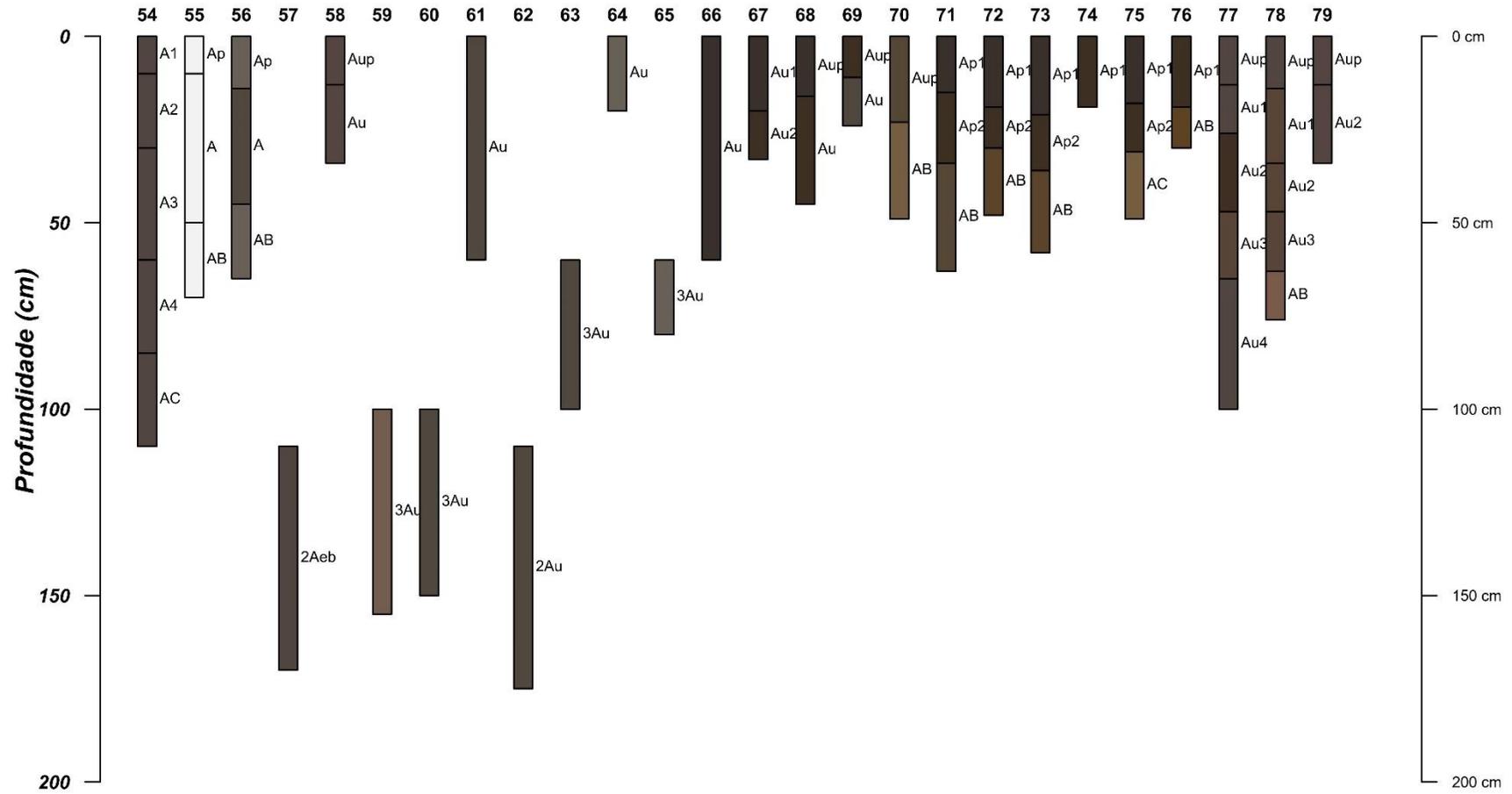
O SiBCS não adota critério de cor para definir o horizonte A antrópico, diferentemente do WRB que usa como critério para o *Pretic horizon* o valor  $\leq 4$  e croma  $\leq 3$  (de acordo com as cores de Munsell), valores consistentes com o observado para as cores da maioria dos perfis

do acervo avaliados. Isto é, de um total de 104 perfis, 98 apresentaram dados de cor; e desses 98 perfis, 92 perfis apresentaram cores que atendem aos critérios para o *Pretic horizon* no WRB, correspondendo a 94% dos perfis. Porém, apesar de serem identificados no acervo solos com horizonte A antrópico de cores mais claras, esses são apenas 6% dos perfis. Dessa forma, sugere-se a incorporação do atributo cor Munsell no SiBCS, já que a cor escura é uma característica marcante das TPI, já para o WRB, os resultados validam o critério de cor Munsell atual.

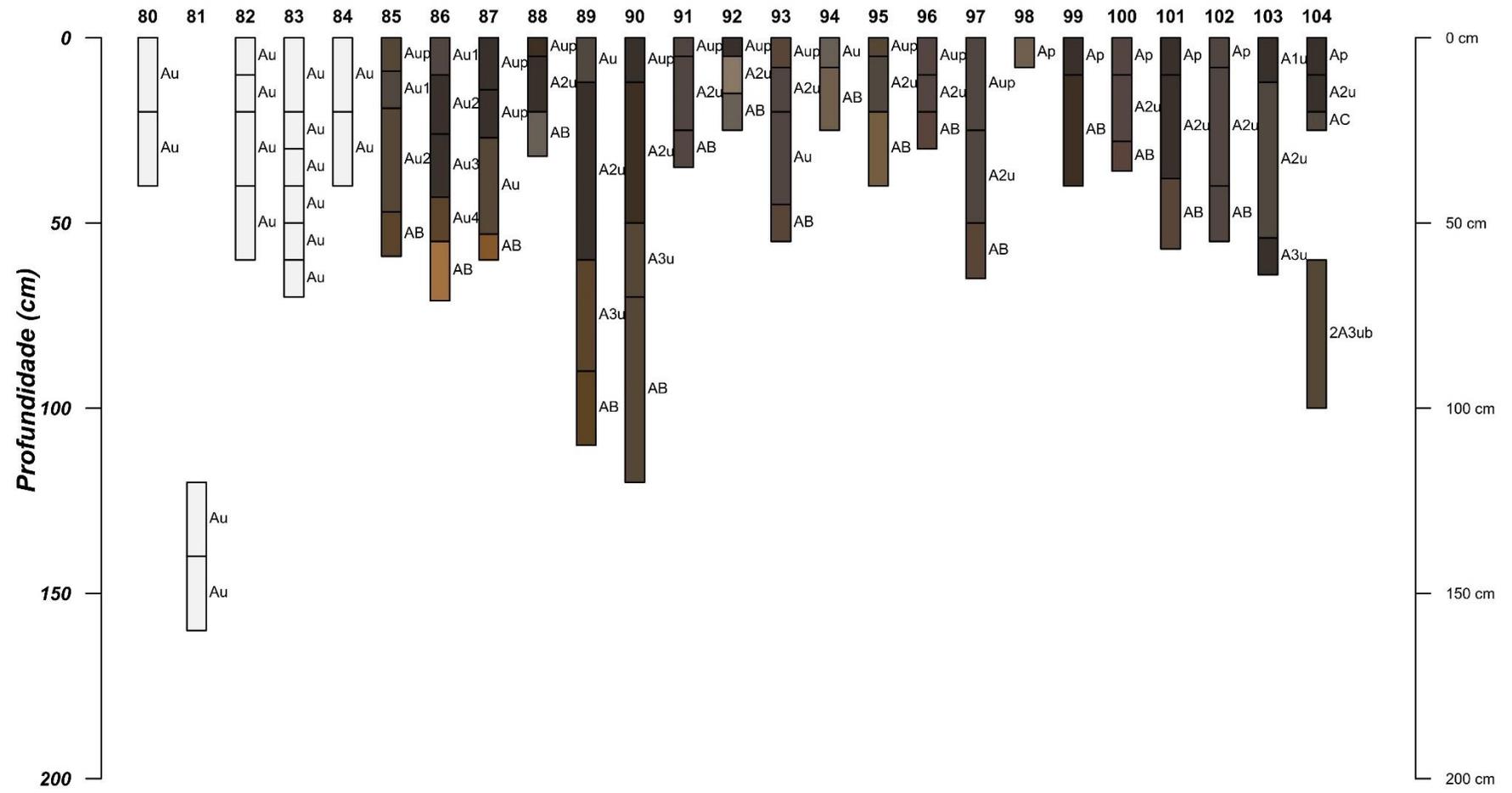


**Figura 9.** Representação de cor, usando os padrões da Carta de Munsell, e espessura dos horizontes A antrópicos de perfis na base de dados (número 1 ao 26), de acordo com o pacote AQP (BEAUDETTE et al., 2011).





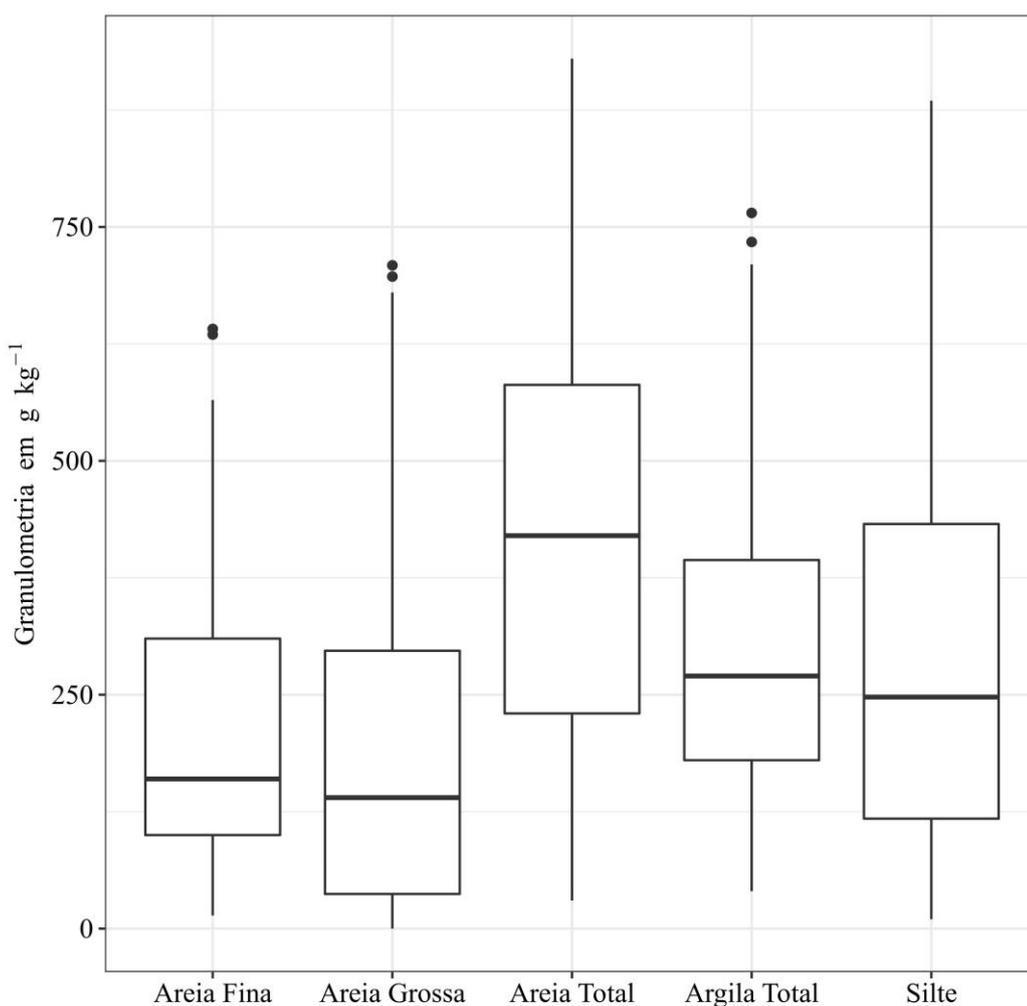
**Figura 11.** Representação de cor, usando os padrões da Carta de Munsell, e espessura dos horizontes A antrópicos de perfis na base de dados (número 54 ao 79), de acordo com o pacote AQP (BEAUDETTE et al., 2011).



**Figura 12.** Representação de cor, usando os padrões da Carta de Munsell, e espessura dos horizontes A antrópicos de perfis na base de dados (número 80 ao 104), de acordo com o pacote AQP (BEAUDETTE et al., 2011).

## 5.2 Granulometria

A granulometria dos horizontes A antrópicos nos perfis compilados mostra maiores valores para a fração areia, no qual a média, mediana e desvio padrão da areia total foram de, respectivamente, 429 e 420, 179 g kg<sup>-1</sup>, com valor máximo observado de 930 g kg<sup>-1</sup> e mínimo de 30 g kg<sup>-1</sup>. A participação da areia fina e areia grossa na composição da areia total foi bem equilibrada. A média e mediana da fração argila foram de 293 e 270 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, e o desvio padrão foi de 149 g kg<sup>-1</sup>. O valor máximo de argila foi de 765 g kg<sup>-1</sup> e o mínimo foi de 40 g kg<sup>-1</sup>. Já o silte teve a média e mediana de, respectivamente, 281 e 248 g kg<sup>-1</sup>, sendo o desvio padrão de 190 g kg<sup>-1</sup>, valor máximo de 885 g kg<sup>-1</sup> e o mínimo de 10 g kg<sup>-1</sup>. A figura 13 mostra o *boxplot* para a variação da granulometria nos horizontes A antrópicos.



**Figura 13.** Boxplot da granulometria dos horizontes A antrópicos nos perfis compilados.

A heterogeneidade geológica e os diversos relevos, em uma condição de clima tropical úmido, foram fatores determinantes na formação de solos na região Amazônica (LOUREIRO, 2002). A granulometria variada dos horizontes A antrópicos avaliados mostram que a ocupação dos povos pré-colombianos se deu em áreas com diferentes tipos de solos, corroborando também com as diversas classes de solos (SiBCS) em que foram identificados os horizontes A

antrópicos, quais sejam: Argissolos, Latossolos, Cambissolos, Neossolos, Gleissolos e Plintossolos. Embora a granulometria seja um critério diagnóstico importante para definir outros horizontes diagnósticos (e.g. relação textural no B textural e limite de % argila em B latossólico) ela não é relevante como critério, pois além de grande variação, não diferencia os solos com A antrópico dos demais solos, como também foi verificado nos trabalhos de Lima (2001) e Corrêa (2007).

Os perfis com horizontes antrópicos de textura mais arenosa, isto é, com mais de 85% da fração areia, foram identificados por Corrêa (2007) e foram classificados como Neossolos Quartzarênicos. Esses perfis situam-se em áreas planas e mais elevadas, de sedimentos terciários, à margem do Rio Negro, AM. Outro exemplo desse fenômeno foi relatado por Martins et al. (2007) que também encontraram horizontes antrópicos em Neossolos Quartzarênicos no município de Parintins, AM.

Já os perfis com horizontes antrópicos de textura mais argilosa, com mais de 60% de argila, foram identificados por Kern e Kämpf (1989), Macedo et al. (2007) e Aquino et al. (2016). O perfil com 70% de argila no A antrópico, descrito por Kern e Kämpf (1989), não possui classificação taxonômica, porém encontra-se adjacente à um Plintossolo Pétrico e ocorre em área de interflúvio entre dois igarapés que desaguam no rio Trombetas, PA. Já Macedo et al. (2007) registram dois perfis de Argissolo Amarelo, com A antrópico de mais de 60% de argila, localizados no município de Iraduba, AM; com argilitos e siltitos como material de origem. Da mesma maneira, Aquino et al. (2016) identifica Argissolo Amarelo com A antrópico de mais de 65% de argila, em topo da paisagem, no município de Apuí, AM; o material de origem predominante é derivado de gnaisses.

Portanto, tendo em vista que a granulometria em TPI é influenciada pelo material de origem e posição na paisagem, sem interferência antrópica, e não os diferenciando dos solos não antrópicos da região, esta não deve ser usada como critério diagnóstico para o horizonte A antrópico no SiBCS, embora seja relevante para diferenciar os solos com esse horizonte, quanto a seu potencial agrícola / fragilidade ambiental.

### 5.3 Atributos químicos

Os solos da região amazônica, em geral, apresentam teores elevados de  $Al^{3+}$  e, conseqüentemente, baixos valores de pH em água, sendo as principais características relatadas para esses solos a acidez e baixa fertilidade (SCHAEFER et al., 2017). A alta precipitação pluviométrica e o clima tropical úmido, bem como a intensa atividade biológica, favorecem a rápida decomposição da matéria orgânica e a lixiviação das bases trocáveis como  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $K^+$  do solo (ECHART; CAVALLI-MOLINA, 2001). No entanto, os horizontes identificados como antrópicos nas TPIs, na região amazônica, diferem bastante dessas características, como pode ser observado nos *boxplots* dos atributos químicos dos horizontes antrópicos da base de dados deste estudo (Figura 14). As informações referentes aos parâmetros gerados nos *boxplots* estão explicados no item Material e Métodos deste mesmo capítulo.

Os valores de pH em água, na maioria, estão acima de 5 (Figura 14a), sendo a média e a mediana de 5,7, o desvio padrão de 0,8 e os valores máximo e mínimo, respectivamente, de 7,9 e 3,7. Os dados de  $Al^{3+}$  nos horizontes antrópicos avaliados tiveram amplitude de 0 a 5,5

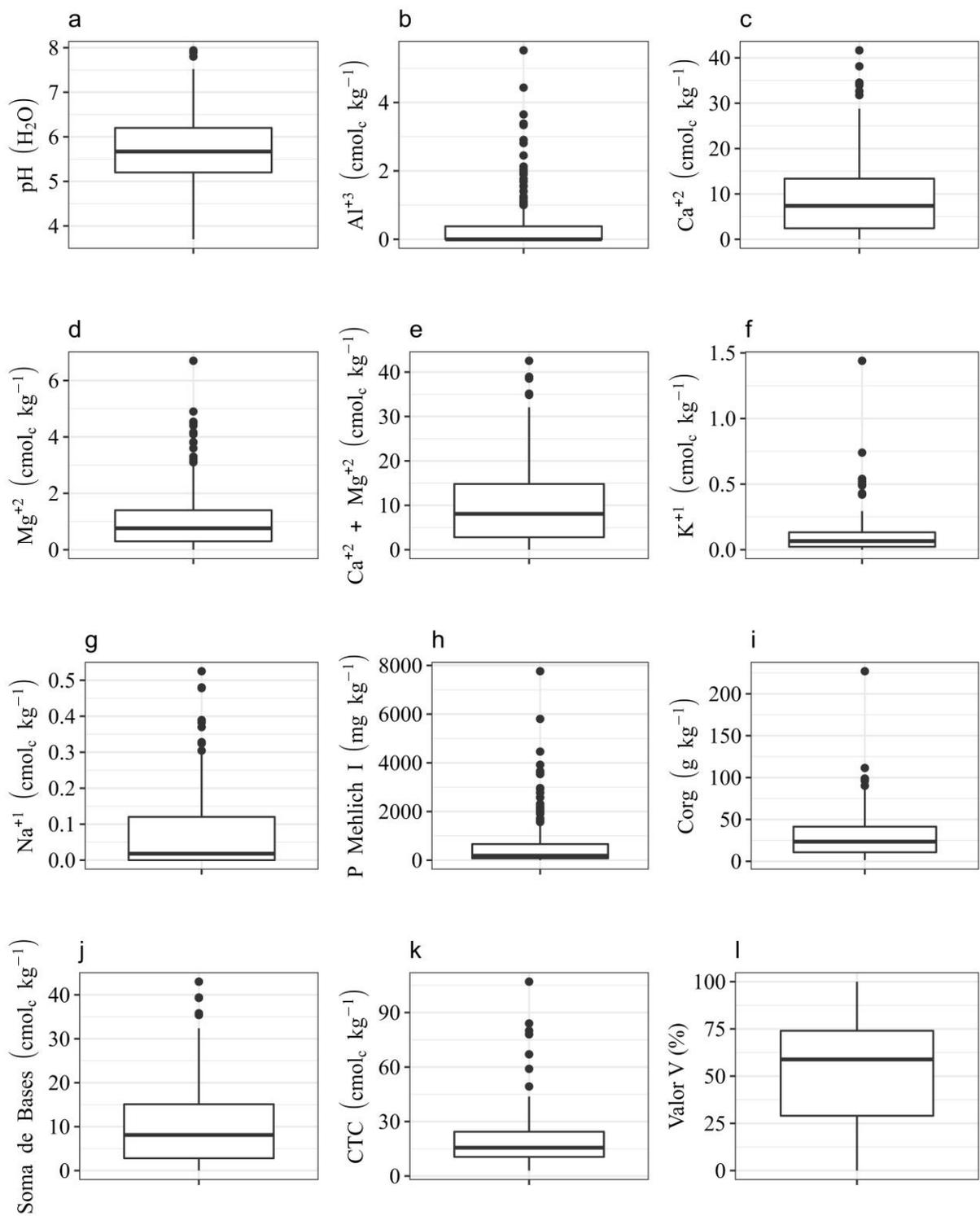
cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>. Embora, mesmo com a grande amplitude, a mediana para Al<sup>3+</sup> foi de 0 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> (Figura 14b), mostrando que os horizontes A antrópicos têm pouca participação do Al<sup>3+</sup> no complexo de trocas. Essa é uma das características favoráveis das TPI, uma vez que o Al<sup>3+</sup> é um dos fatores limitantes, quanto a fertilidade, para o crescimento radicular e a capacidade produtiva das plantas. Os valores de pH mais elevado e os baixos teores de Al<sup>3+</sup> nos horizontes antrópicos são diferenciais marcantes de solos Amazônicos não antrópicos, conforme os trabalhos de Kämpf e Kern (2005), Lima (2001), Corrêa (2007), Campos et al. (2011), Lehmann et al. (2003), Glaser (2007), Cunha et al. (2009a), dentre diversos autores que estudaram TPIs.

A menor acidez dos solos antrópicos está relacionada diretamente à adição de materiais carbonáceos, principalmente cinzas, que apresentam componentes alcalinos como carbonato de cálcio, hidróxidos de cálcio, sulfato de cálcio, sais de ferro e magnésio e carbonatos e hidróxidos de sódio e potássio (WOODS et al., 2009).

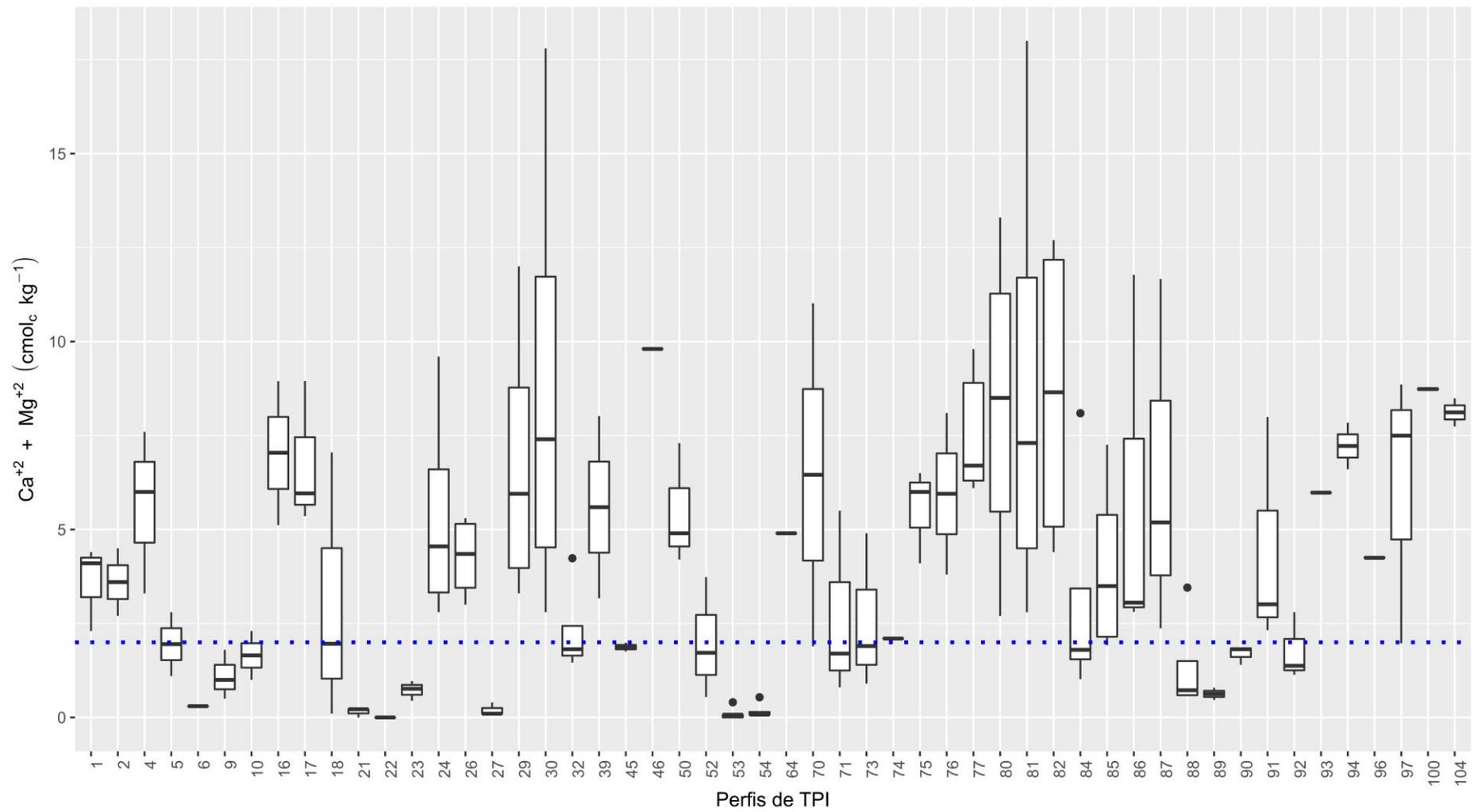
Paralelamente, como resposta aos atributos acima discutidos, verificou-se teores elevados tanto para o Ca<sup>2+</sup> quanto para o Mg<sup>2+</sup> (Figura 14c e 14d). A soma de Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> apresentou média de 9,9 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, mediana de 8,1 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, desvio padrão de 8,6 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> e variação de valores de 0 a 42,5 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> (Figura 14e). Esses elevados teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> são relacionados também ao alto teor de matéria orgânica nesses solos e sua alta estabilidade, uma vez que a sua maior afinidade com os íons de Ca, principalmente, permite que sejam acumulados no solo, o que foi observado também por Cunha et al. (2009a).

As figuras 15 e 16 mostram os valores de Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> dos 104 perfis de TPI da base de dados dos 104 perfis de TPI avaliados, separados por faixas de valores para facilitar a visualização dos dados em *boxplots*. A figura 15 representa os *boxplots* dos valores de Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> que tiveram valores de mediana até 10 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>. Destaca-se que 90% dos horizontes considerados antrópicos possuem Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> ≥ 2,0 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> (Figura 15, linha pontilhada em azul), teor esse considerado bom indicador de fertilidade do solo (TOMÉ JÚNIOR, 1997). A figura 16 representa os *boxplots* dos valores de Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> que tiveram valores de mediana superiores a 10 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>. A elevada fertilidade e os altos teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> foram relatados por diversos autores (LIMA, 2001; MADARI et al., 2009; SCHAEFER et al., 2017; SCHMIDT, 2013; TEIXEIRA et al., 2009) e estão relacionados ao aporte de ossos, artefatos líticos e cerâmicos pelos povos pré-Colombianos.

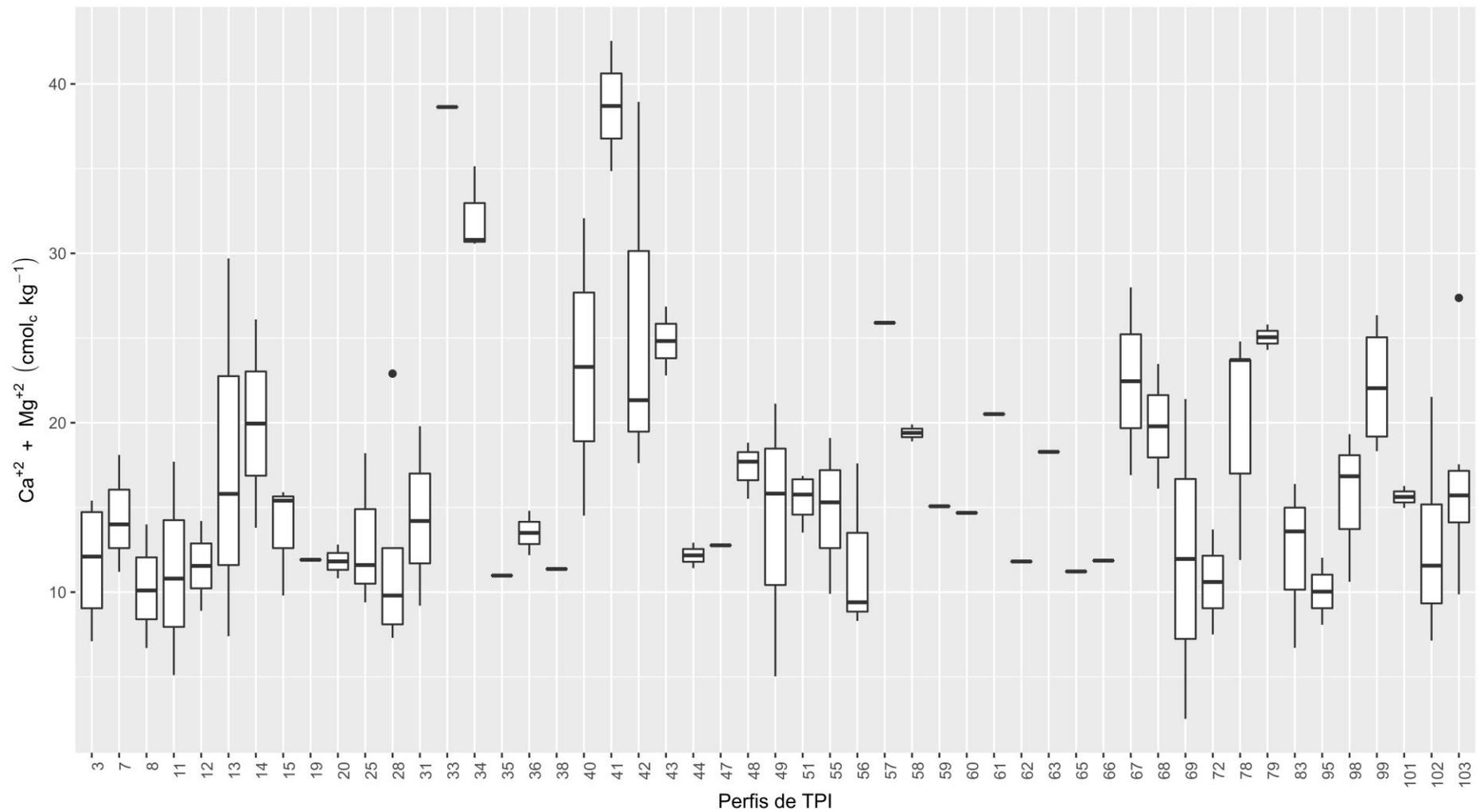
O valor de Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> ≥ 2,0 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> é adotado pelo WRB como critério limite para definir o *Preitic horizon*. Porém, foi observado que os horizontes antrópicos de baixos teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> (menores que 1,0 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) presentes em 5 perfis, estão relacionados à uma textura mais arenosa (com mais de 70% de areia) (CORRÊA, 2007; MARTINS et al., 2007). Esses elementos, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, podem ter sido removidos no decorrer do tempo (i.e., o tempo de formação das TPI, que possui datações de mais de mil anos), seja pelo cultivo agrícola ou lixiviação natural, ou ainda, nas áreas onde se formaram os solos houve menor adição (menor quantidade de fontes desses elementos ou ocupação). Dessa forma, sugere-se a não incorporação desse atributo como critério de classificação de horizonte A antrópico no SiBCS.



**Figura 14.** Boxplots dos atributos químicos dos horizontes antrópicos do acervo de dados.



**Figura 15.** Boxplots dos teores de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  dos perfis de TPI da base de dados que tiveram valores de mediana até  $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . A linha azul passa pelo eixo y dos teores de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  correspondente ao valor de  $2,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .



**Figura 16.** Boxplots dos teores de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  dos perfis de TPI da base de dados que tiveram valores de mediana superior a  $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

Os teores de  $K^+$  dos horizontes antrópicos na base de dados variaram entre 0 e 1,44  $cmol_c kg^{-1}$  (Figura 14f), com média, mediana e desvio padrão de 0,10; 0,07 e 0,13  $cmol_c kg^{-1}$ , respectivamente. A variação do  $Na^+$  foi menor que a do  $K^+$  (Figura 14g), tendo média e mediana de, respectivamente, 0,8 e 0,2  $cmol_c kg^{-1}$ , desvio padrão de 0,11  $cmol_c kg^{-1}$  e valores entre 0 e 0,5  $cmol_c kg^{-1}$ . Esses atributos, em comparação ao  $Ca^{2+}$  e ao  $Mg^{2+}$ , estão presentes em menores quantidades no solo podendo ser explicado pela menor valência do  $K^+$  e  $Na^+$ , fazendo com que tenham maior mobilidade no solo, portanto mais facilmente lixiviados. Dessa forma, não foram selecionados como atributos importantes para diferenciação dos solos antrópicos e, portanto, como critérios de classificação para horizontes antrópicos. Por outro lado, os baixos valores de  $Na^+$  são esperados em função da natureza do material de origem e condições climáticas da região. O mesmo para os teores de  $K^+$ , que embora seja macronutriente, logo importante para a nutrição das plantas, é rapidamente lixiviado devido às condições climáticas da Amazônia.

Dado aos elevados teores de cátions no complexo sortivo, em especial  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , os horizontes antrópicos avaliados mostram, em geral, elevada soma de bases (SB) (Figura 14j), com média de 10,1  $cmol_c kg^{-1}$  e mediana de 8,1  $cmol_c kg^{-1}$ , desvio padrão de 8,7  $cmol_c kg^{-1}$  e valores entre 0 e 43,0  $cmol_c kg^{-1}$ . Vale ressaltar que apenas 3 perfis, dentro do total de 104 perfis, possuem horizontes com valor de SB igual a zero, sendo provenientes dos trabalhos de Corrêa (2007) e Martins et al. (2007). Como já discutido, esses perfis têm horizontes antrópicos de textura arenosa (mais que 70% de areia) e são classificados como Neossolos Quartzarênicos, explicando os valores de bases extraíveis abaixo do mínimo quantificável pelo método usado.

Em acordo com os valores de SB, a capacidade de troca catiônica (CTC) também apresentou valores elevados (Figura 14k), assim como a saturação de bases (valor V%) (Figura 14l), corroborando a influência da matéria orgânica sobre a quantidade de cargas negativas e na retenção de cátions. A CTC variou entre 3,0 e 107,0  $cmol_c kg^{-1}$  com média 19,1  $cmol_c kg^{-1}$ , mediana de 15,6  $cmol_c kg^{-1}$  e desvio padrão de 14,1  $cmol_c kg^{-1}$ . O valor V% dos horizontes antrópicos mostrou variação entre 0,2 e 100%, com média e mediana de 53 e 59%, respectivamente, e o desvio padrão de 28%. Do total de 104 perfis, 70% apresentam horizontes com V% maior ou igual a 50%. Apesar de a CTC e o valor V% da maioria dos solos antrópicos serem elevados e se destacarem dos solos não antrópicos da região Amazônica, assim como para os teores de  $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ , estes parâmetros variam com a granulometria do solo e os teores de matéria orgânica. Dessa forma, optou-se por não os incorporar aos critérios de classificação para o horizonte A antrópico no SiBCS ou como sugestão para o *Pretic horizon* no WRB.

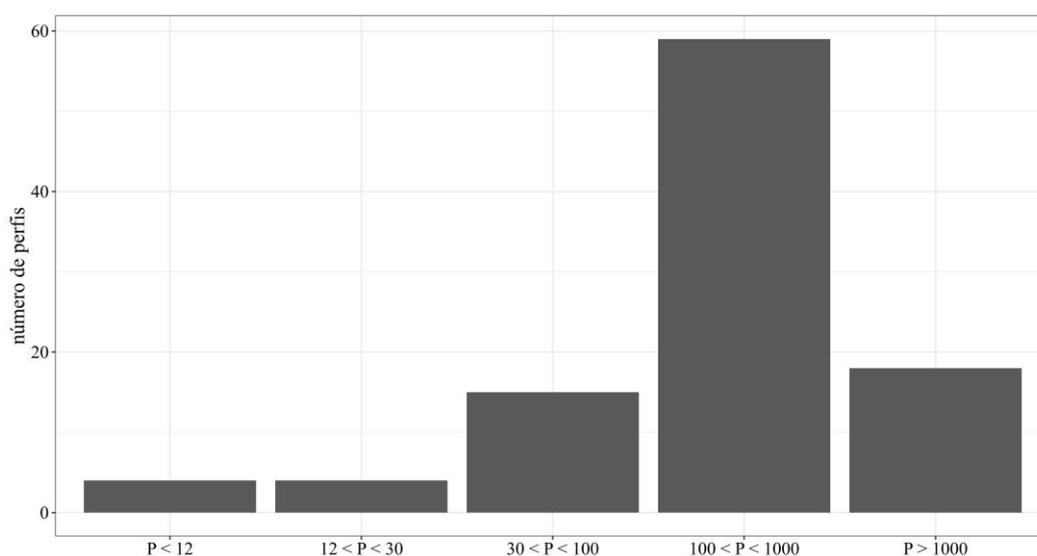
O P, que é o atributo que mais se destaca nos horizontes A antrópicos pelos elevados teores apresentou grande amplitude, entre 3 e 7761  $mg kg^{-1}$  (Figura 14h). A média foi de 556  $mg kg^{-1}$ , a mediana de 186  $mg kg^{-1}$ , e desvio padrão de 936  $mg kg^{-1}$ . De acordo com Moreira et al. (2005), para os solos da região Amazônica, teores de P acima de 25,0  $mg dm^{-3}$  são altos em termos de fertilidade do solo, enquanto os teores de P menores que 12  $mg dm^{-3}$  são baixos. Portanto, de 100 perfis contendo horizontes antrópicos e seus respectivos dados de P, apenas 5 perfis apresentaram teores de P baixos ou muito baixos (i.e., menores que 12  $mg dm^{-3}$ ). Por outro lado, 93 perfis apresentaram horizontes antrópicos com teores de P altos (i.e., maiores que 30  $mg dm^{-3}$ ) e apenas 2 perfis apresentaram horizontes antrópicos com teores médios de P, entre 12 e 25  $mg dm^{-3}$  (Figura 17).

Os elevados teores de P nas TPIs são atribuídos à deposição de restos de animais como ossos de peixe, de cinzas e dejetos humanos, além de outros compostos orgânicos e minerais

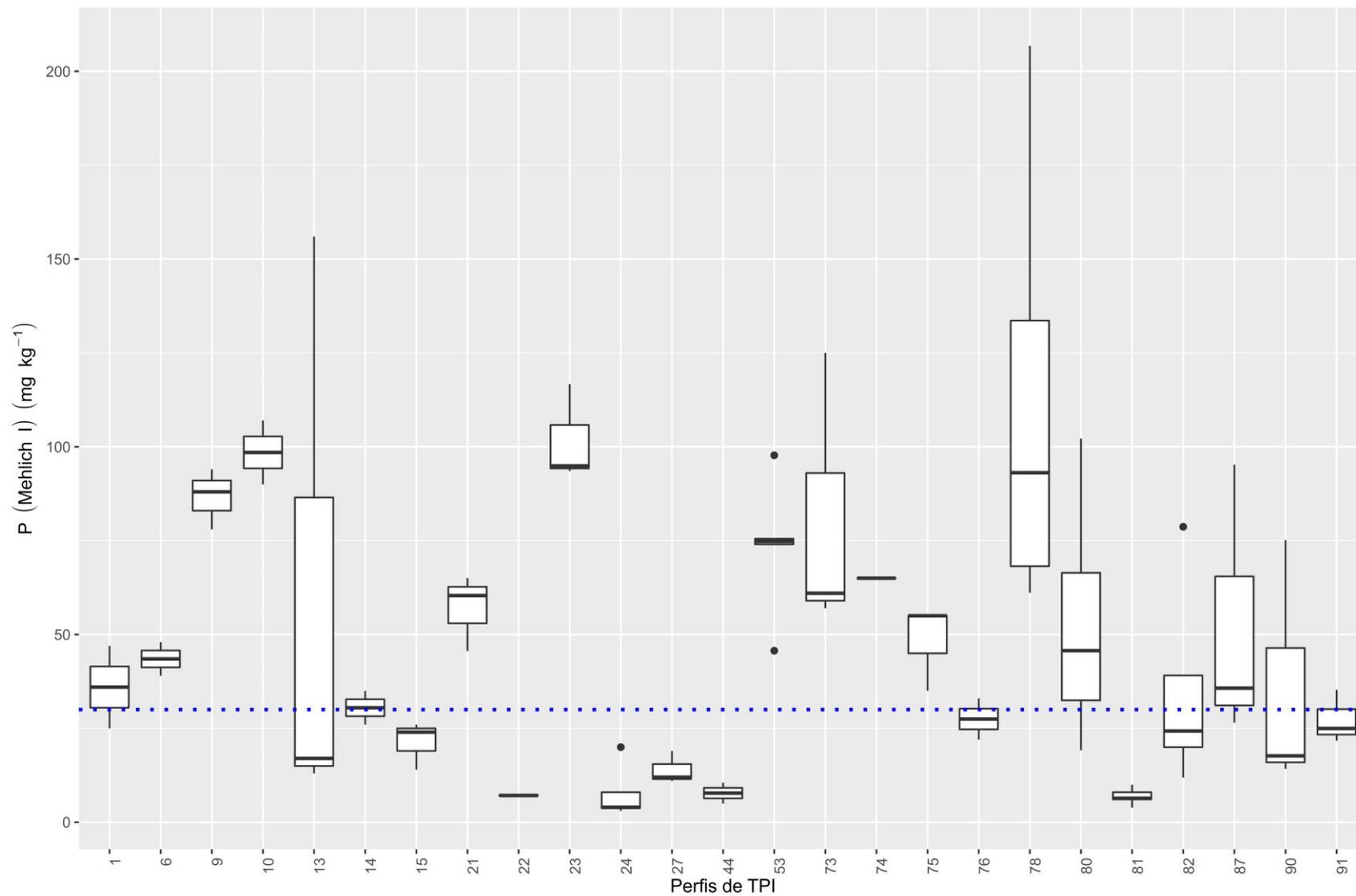
que são ricos nesse elemento (KERN et al., 2009). Os 5 perfis que apresentaram teores de P baixos, são provenientes dos trabalhos de Corrêa (2007), Silva et al. (2012), Kämpf e Kern (2005), Souza (2011b), Cavassani (2018) e Miranda (2018). Os autores explicam que os baixos teores de P estão relacionados à sítios onde a deposição de ossos e desejos humanos foi menor, podendo ter sido também influenciados pelos hábitos alimentares das tribos ou ainda a solubilização e lixiviação de compostos fosfatados mais solúveis, e também um menor tempo de ocupação dos povos Pré-Colombianos neste ambiente.

O teor de P é o atributo que mais se destaca de solos não antrópicos na região amazônica; portanto, o seu uso como critério quantitativo para a identificação do horizonte A antrópico (SiBCS) e do *Pretic horizon* (WRB) é muito relevante. As figuras 18, 19, 20 e 21 apresentam os *boxplots* dos valores de P dos perfis de TPI da base de dados (os quais apresentavam dados de P), que foram divididos em faixas de valores para facilitar a visualização. A figura 18 apresenta os *boxplots* dos valores de P que tiveram mediana até  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ , já a figura 19 apresenta os *boxplots* dos valores de P que tiveram mediana entre 100 e  $250 \text{ mg kg}^{-1}$ . A figura 20 representa os que tiveram mediana entre 250 e  $750 \text{ mg kg}^{-1}$ . Por fim, a figura 21 apresenta os *boxplots* dos valores de P que tiveram mediana superior a  $750 \text{ mg kg}^{-1}$ . Dos 100 perfis com dados de P, 75% dos perfis apresentam horizonte antrópico com conteúdo  $> 100 \text{ mg kg}^{-1}$  de P e 95% dos horizontes possuem  $P \geq 30,0 \text{ mg kg}^{-1}$  (Figura 18, linha pontilhada em azul).

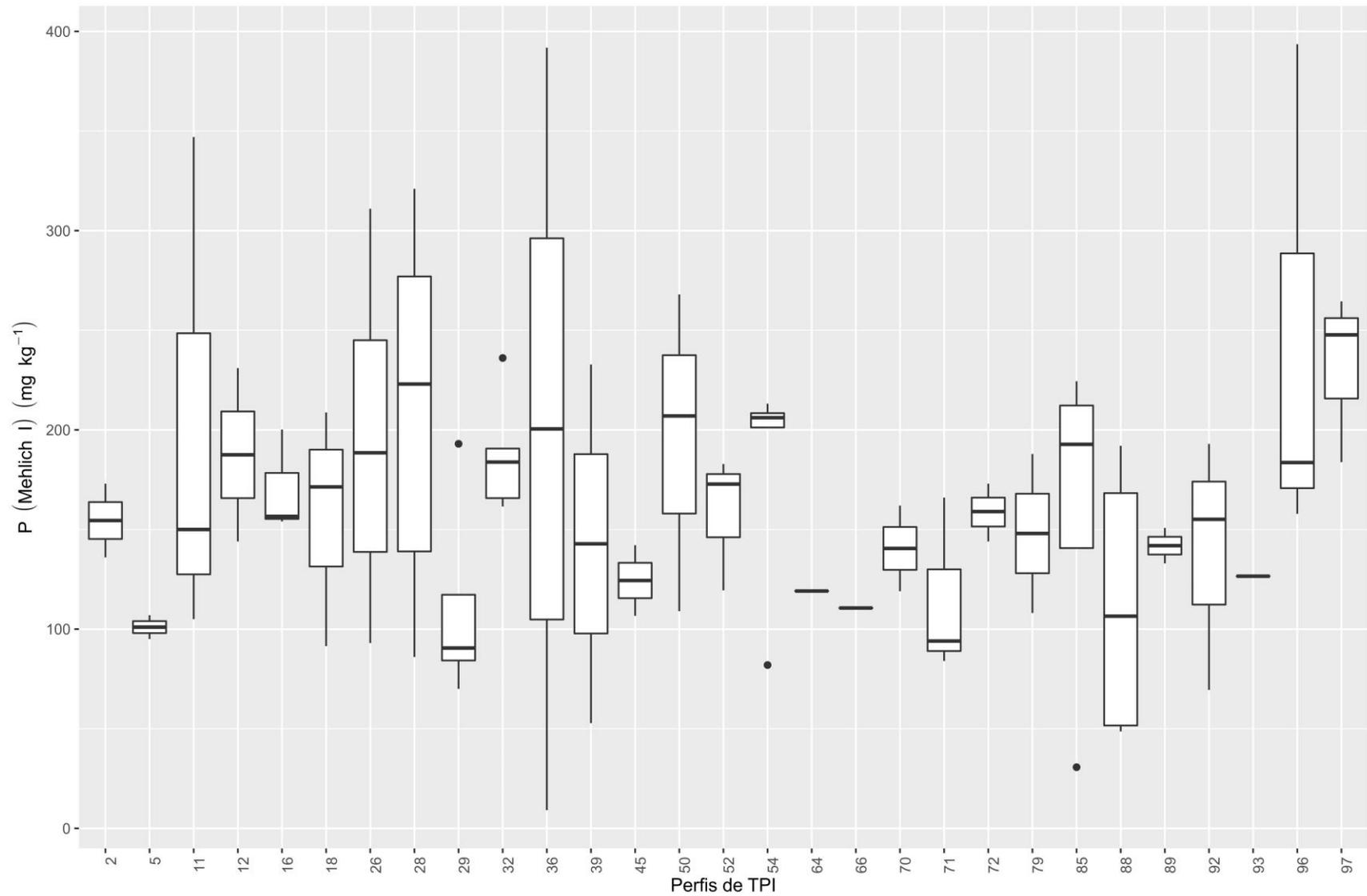
O valor de  $P \geq 30,0 \text{ mg kg}^{-1}$  é o atual limite inferior para a identificação do *Pretic horizon* no WRB e, também, proposto por Cordeiro et al. (2017a) como critério para o horizonte A antrópico no SiBCS. Levando em consideração a importância do teor elevado de P nos solos tropicais, sendo este um diferencial para os solos não antrópicos formados no mesmo ambiente e material de origem, deve ser considerado como critério de identificação para os horizontes A antrópicos e mantido no *Pretic horizon*, no WRB. Dessa forma, nesse estudo, foi possível validar a relevância de utilizar esse critério quantitativo,  $P \geq 30,0 \text{ mg kg}^{-1}$ , para ambos os sistemas de classificação.



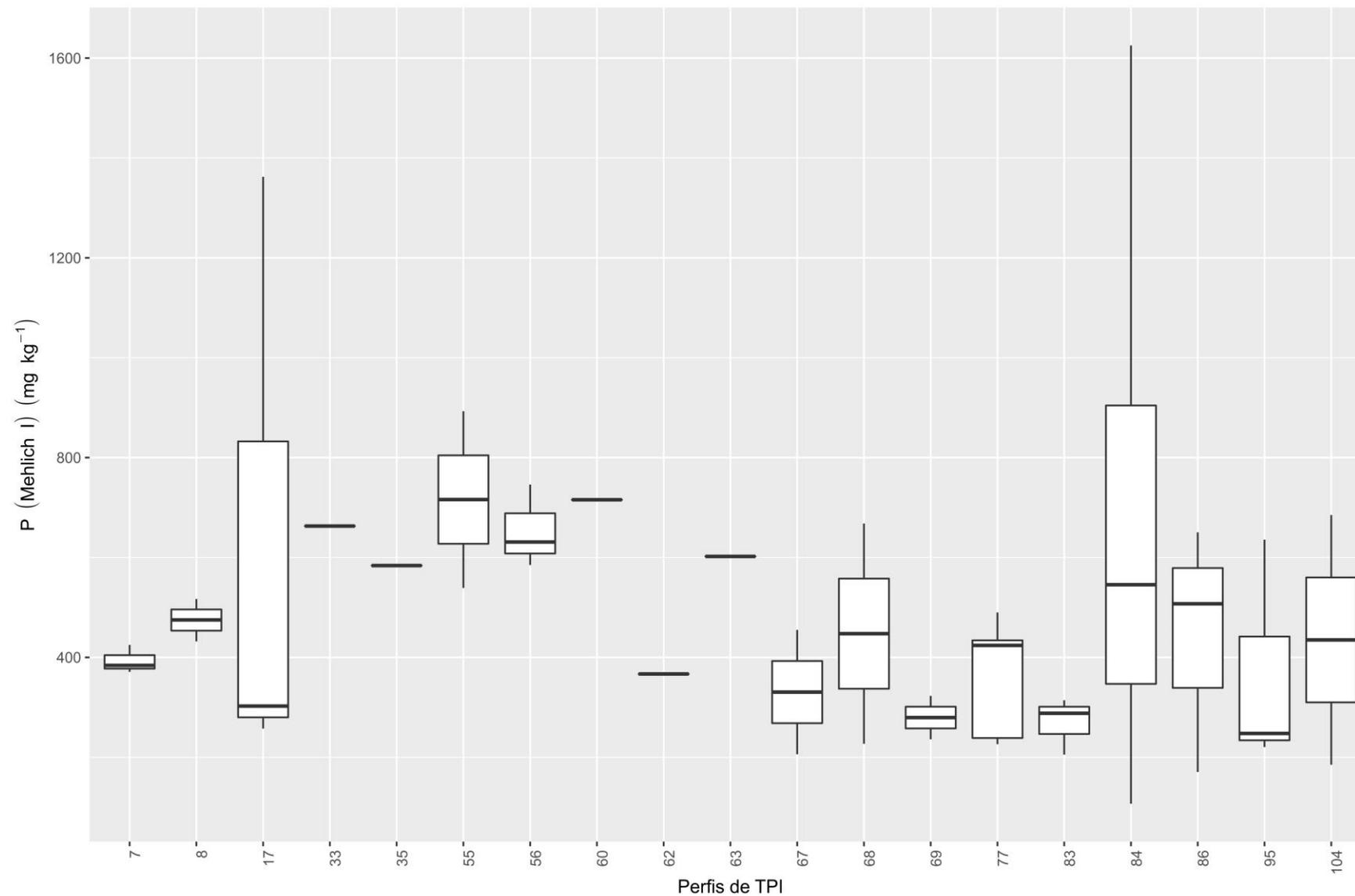
**Figura 17.** Distribuição de número de perfis de solos com horizontes antrópicos em função de intervalos de classes de teores de P em  $\text{mg kg}^{-1}$ .



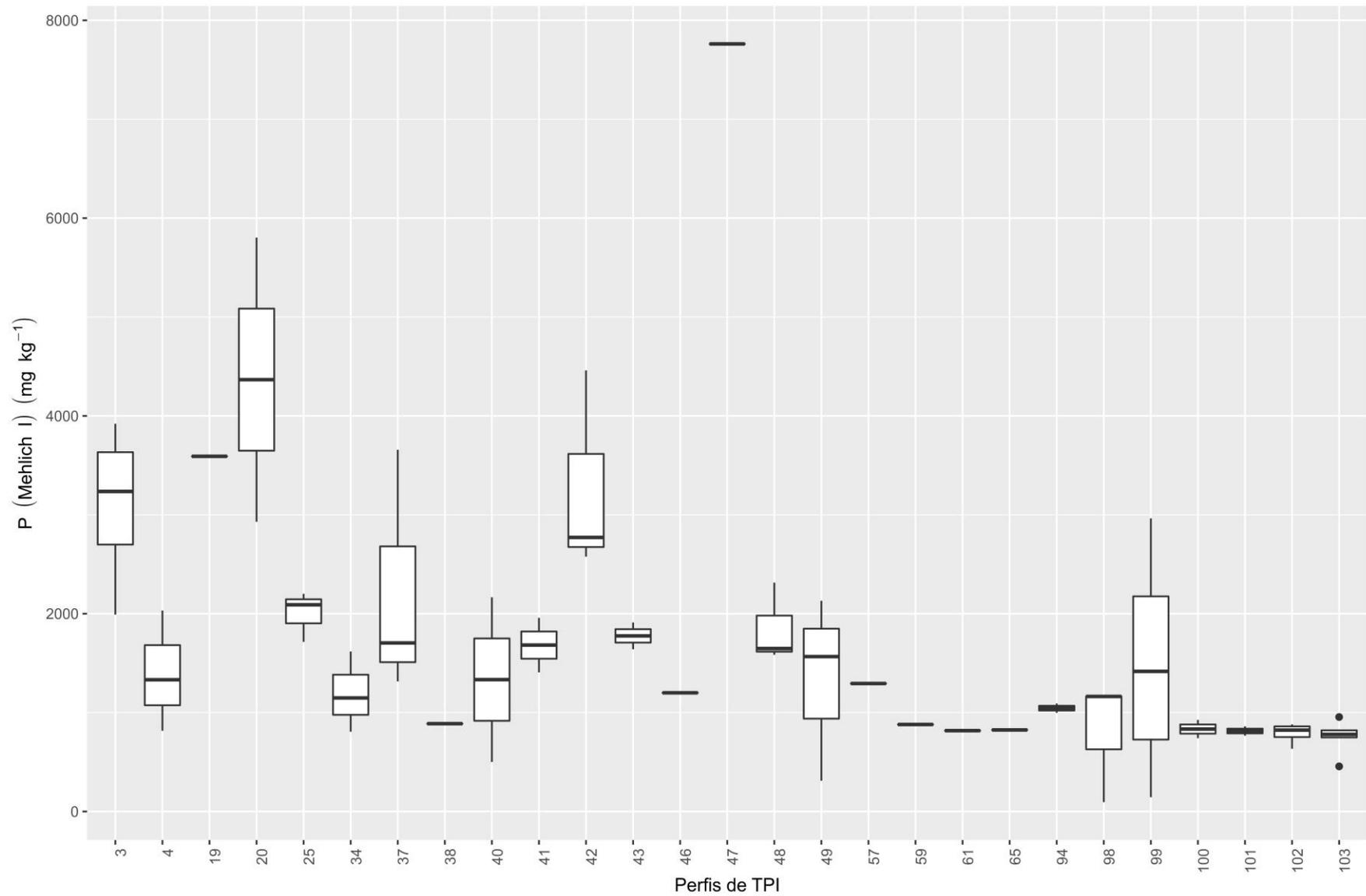
**Figura 18.** Boxplots dos teores de P dos perfis de TPI do acervo de dados com medianas até 100 mg kg<sup>-1</sup>. A linha pontilhada azul passa pelo eixo y no teor de P de 30 mg kg<sup>-1</sup>.



**Figura 19.** Boxplots dos teores de P dos perfis de TPI do acervo de dados com medianas entre 100 e 250 mg kg<sup>-1</sup>.



**Figura 20.** Boxplots dos teores de P dos perfis de TPI do acervo de dados com medianas entre 250 e 750 mg kg<sup>-1</sup>.

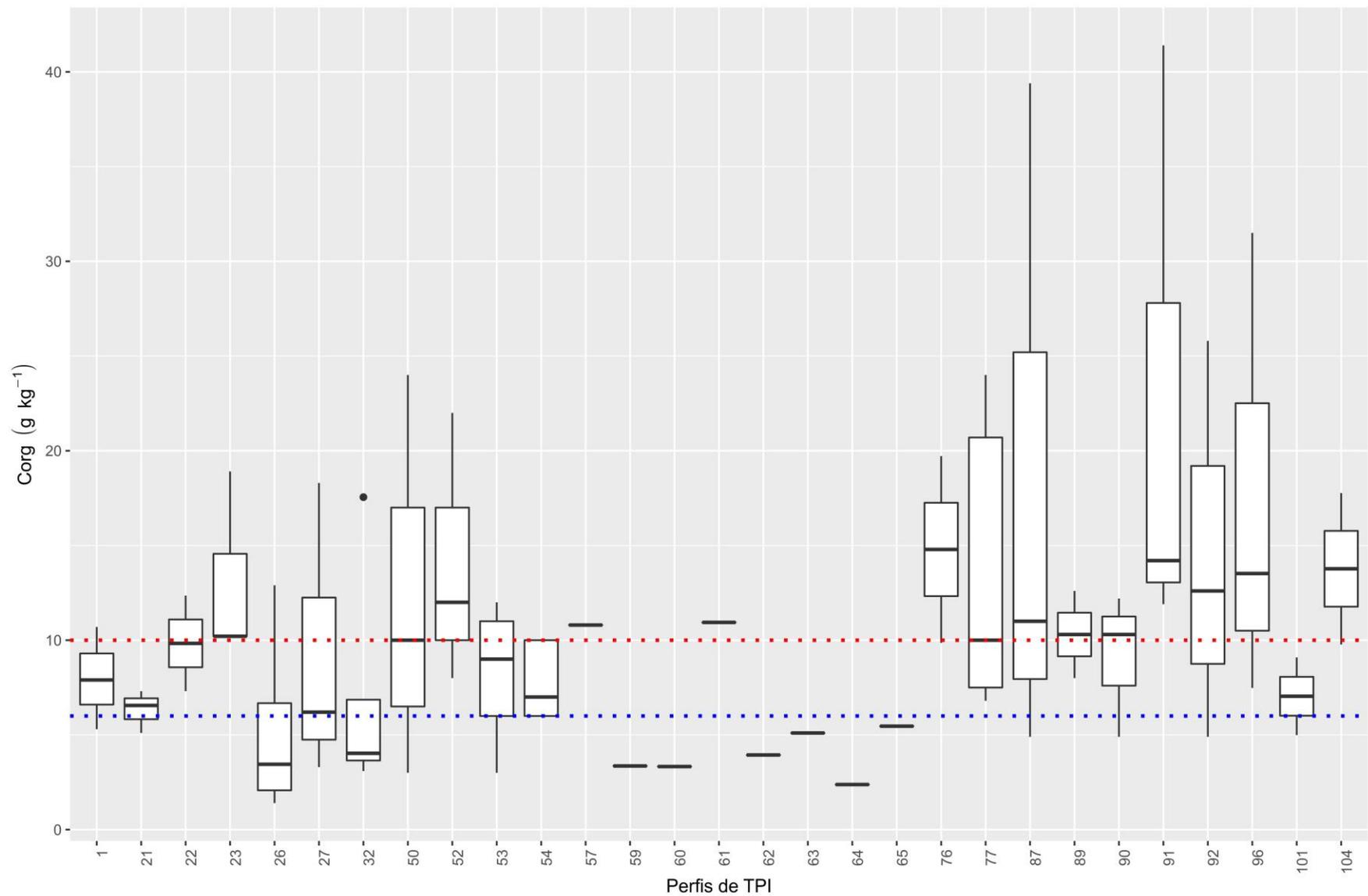


**Figura 21.** Boxplots dos teores de P dos perfis de TPI do acervo de dados com medianas superiores a 750 mg kg<sup>-1</sup>.

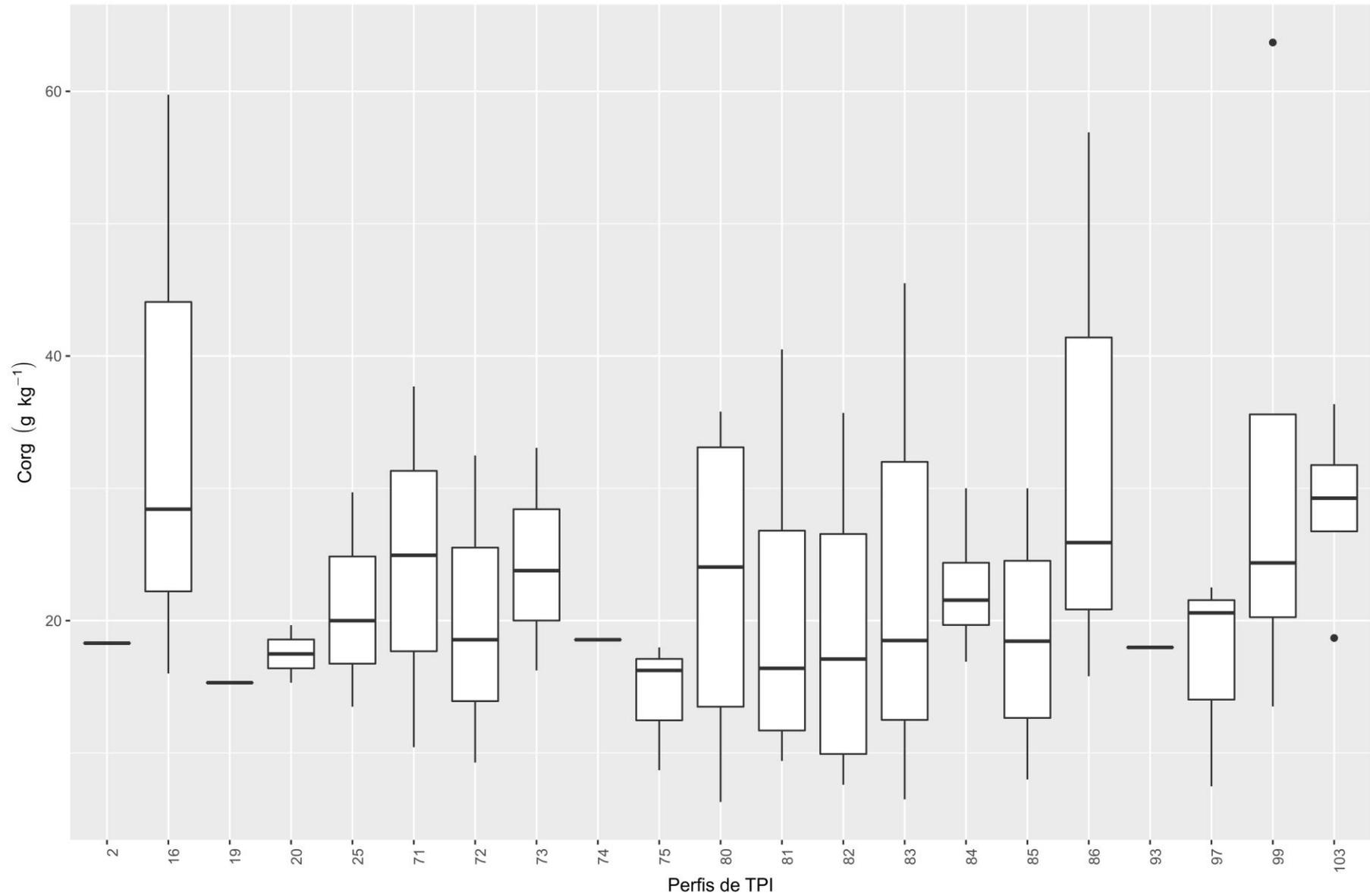
Em função da importância da matéria orgânica para os atributos que caracterizam as TPI, tais como, cor escura, CTC e SB, como esperado, os solos da base de dados apresentaram valores de carbono orgânico (Corg), em geral, maiores que  $10 \text{ g kg}^{-1}$  (Figura 14i). Os teores de Corg. variaram de 1,4 a  $111,5 \text{ g kg}^{-1}$ , com média de  $29,2 \text{ g kg}^{-1}$  e mediana de  $22,7 \text{ g kg}^{-1}$ . As figuras 22, 23 e 24 apresentam os *boxplots* dos valores de Corg dos perfis de TPI da base de dados (os quais apresentavam dados de Corg), que foram divididos em faixas de valores para facilitar a visualização. A figura 22 apresenta os *boxplots* dos valores de Corg que tiveram mediana até  $15 \text{ g kg}^{-1}$ , já a figura 23 apresenta os *boxplots* dos valores de Corg que tiveram mediana entre 15 e  $30 \text{ g kg}^{-1}$ . Por fim, a figura 24 apresenta os *boxplots* dos valores de Corg que tiveram mediana superior a  $30 \text{ g kg}^{-1}$ . Do total de perfis do acervo, apenas 86 contavam com os dados de Corg sendo que 91% desses perfis apresentou teores  $\geq 10,0 \text{ g kg}^{-1}$  (Figura 22, linha pontilhada vermelha), que corresponde ao limite inferior no atual critério para o *Pretic horizon* no WRB (1% de Corg).

Se esse limite inferior fosse reduzido para  $\text{Corg} \geq 6,0 \text{ g kg}^{-1}$  (Figura 22, linha pontilhada azul), critério que também é usado como limite inferior para o horizonte A chernozêmico (SANTOS et al., 2018), 93% dos perfis no acervo de dados seriam enquadrados. Porém, é necessário avaliar que outras características apresentam esses perfis que seriam excluídos e se devem ser considerados como TPI ou seja, com horizonte A antrópico. Dos perfis que apresentavam dados completos de Corg. (i.e., 77 perfis), 69 perfis têm  $\text{Corg} \geq 10,0 \text{ g kg}^{-1}$ . Quando se reduz a proposta para  $\text{Corg} \geq 6,0 \text{ g kg}^{-1}$ , apenas mais 2 perfis passam a atender o critério, passando então para um total de 72 perfis. No entanto, é possível que muitos autores não tenham relatado em seus estudos perfis com A antrópico, por não atenderem a esse critério originado do WRB. Uma outra questão é a própria metodologia usada para determinar o Corg. já que parte relevante da contribuição para o C total nesses solos é oriunda da presença de carvão, que confere às TPIs propriedades peculiares (LIANG et al., 2006; CUNHA et al., 2009; ALHO et al., 2019).

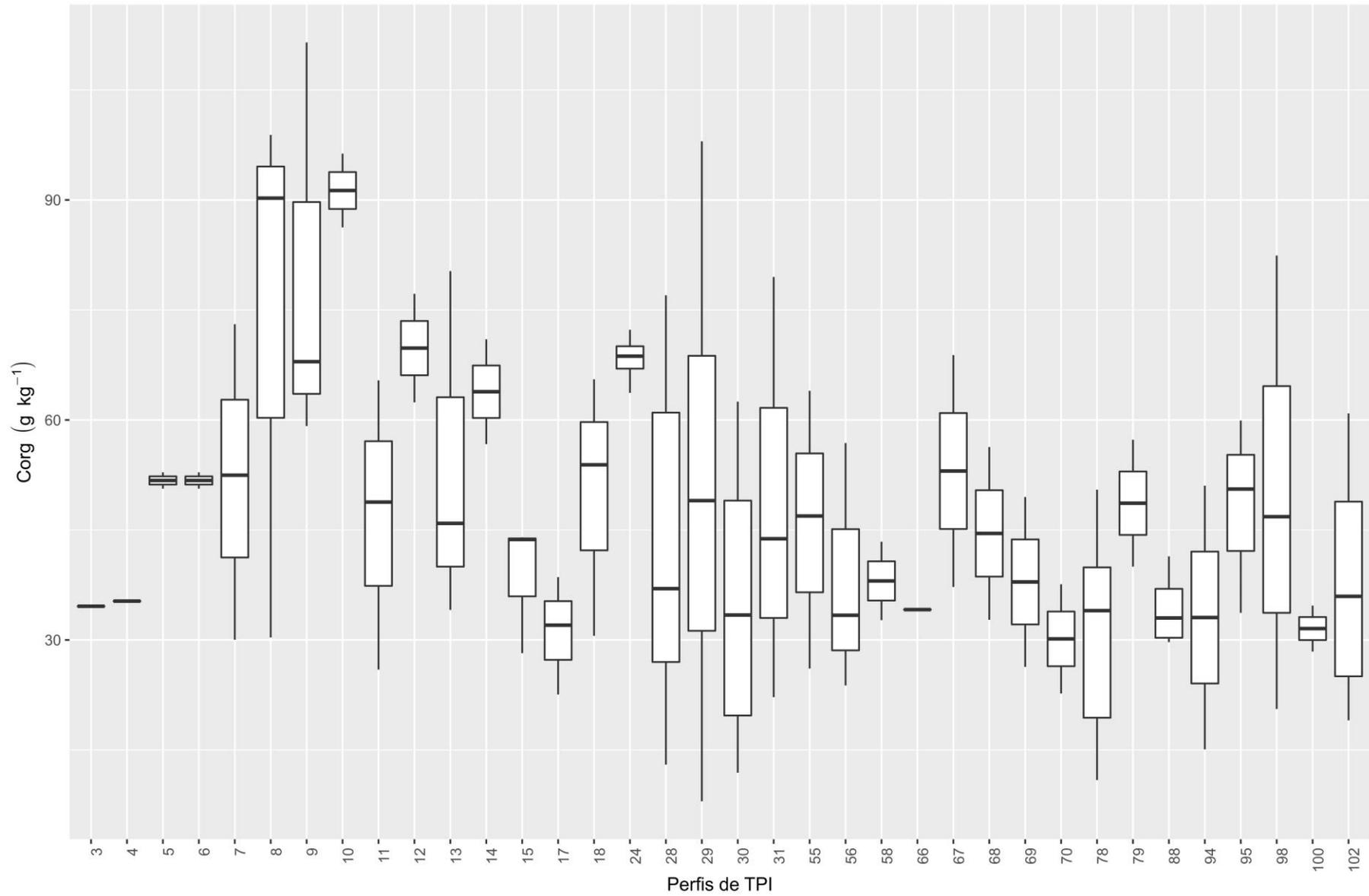
Por outro lado, pode-se argumentar que, devido à alta atividade biológica e o ambiente da região Amazônica, ainda que esses solos sejam caracterizados pela elevada deposição de matéria orgânica e artefatos (incluindo carvão), há mais de 1000 anos pelos povos pré-Colombianos, as condições atuais de clima tropical úmido não favorecem a permanência de teores de Corg superiores a  $10,0 \text{ g kg}^{-1}$ . Logo, poderia ser incluído como critério para o horizonte A antrópico no SiBCS o valor de  $\text{Corg} \geq 6,0 \text{ g kg}^{-1}$ ; bem como a redução do limite inferior de  $10,0 \text{ g kg}^{-1}$  (ou 1% de Corg.) para  $6,0 \text{ g kg}^{-1}$  (ou 0,6%) para definir o *Pretic horizon* no WRB.



**Figura 22.** Boxplots dos teores de Corg. dos perfis de TPI da base de dados com valores de mediana até 15,0 g kg<sup>-1</sup>. A linha azul passa pelo eixo y dos teores de Corg em 10,0 g kg<sup>-1</sup> e a linha vermelha em 6,0 g kg<sup>-1</sup>.



**Figura 23.** Boxplots dos teores de Corg. dos perfis de TPI da base de dados com valores de mediana entre 15,0 e 30,0 g kg<sup>-1</sup>.



**Figura 24.** Boxplots dos teores de Corg. dos perfis de TPI da base de dados com valores de mediana superior a 30,0 g kg<sup>-1</sup>.

#### 5.4 Análise dos critérios vigentes para definir o horizonte A antrópico e *Pretic horizon* e propostas para o SiBCS e WRB

Os critérios para a classificação do horizonte A antrópico no SiBCS (SANTOS et al., 2018) são apresentados como “*em fase de validação*”. Verificou-se que dos perfis de TPI do acervo, 91% dos horizontes foram classificados como A antrópico (Tabela 6), porém esses critérios não incluem limites para teores de Corg ou para cor (valor e croma), atributos importantes na caracterização das TPI. Dessa forma, sugere-se a inclusão desses atributos e a redação completa da proposta (destaque de alterações em negrito) seria:

##### **A Antrópico**

Presença obrigatória de artefatos líticos, cerâmicas, restos de ossos, conchas e alimentos, ou vestígios de ação do fogo como a presença de carvão e cinzas; e atender em pelo menos um dos subhorizontes A (incluindo os horizontes intermediários AB e AC):

- i) Espessura maior ou igual a 20 cm, **podendo ser horizontes superficiais contínuos desde a superfície ou a espessura somada de horizontes enterrados; e**
- ii) **Cor Munsell do material do solo com valor  $\leq 4$  e croma  $\leq 3$ , quando úmido; e**
- iii) Teor de fósforo extraível (com solução Mehlich-1) maior ou igual a 30 mg kg<sup>-1</sup>; e
- iv) **Carbono orgânico maior ou igual a 6,0 g kg<sup>-1</sup>.**

A partir da nova proposta e validação com os dados do acervo, 84% (Tabela 6) dos horizontes dos perfis de TPI foram reclassificados como A antrópicos. Houve uma redução da porcentagem de horizontes contemplados com a inclusão do atributo Corg., mas vale ressaltar que 18 perfis do acervo não contavam com os dados de Corg. de seus respectivos horizontes antrópicos, assim, esse percentual poderia ser ainda maior.

A classificação dos perfis da base de dados, a partir dos critérios vigentes do WRB (IUSS WORKING GROUP WRB, 2014), mostram que apenas 71,4% (Tabela 6) foram classificados como *Pretic horizon*. Considerando que o *Pretic horizon* foi incorporado ao WRB para diferenciar as TPI da região Amazônica, a baixa correspondência dos dados compilados aos critérios atuais de classificação da TPI no WRB justifica a proposta de novos critérios para definir o *Pretic horizon*, e conseqüentemente compatibilizar ambos os sistemas (SiBCS e WRB). Os critérios propostos são apresentados a seguir (destaque das alterações em negrito):

##### ***Pretic horizon***

Horizonte mineral, com evidências de ocupação humana pré-histórica tais como a presença obrigatória de artefatos líticos, cerâmicas, restos de ossos, conchas e alimentos, ou vestígios de ação do fogo como a presença de carvão e cinzas; e apresentar em pelo menos um dos subhorizontes A (incluindo os horizontes intermediários AB e AC):

- i) cor Munsell com valor  $\leq 4$  e croma  $\leq 3$ , quando úmido; e
- ii) **teor de carbono orgânico maior ou igual a 0,6%; e**
- ii) teor de P extraível (Mehlich 1) maior ou igual a 30 mg kg<sup>-1</sup>; e
- iii) um ou mais dos seguintes subitens:
  - iii.1) teor maior ou igual a 1% de artefatos (por volume, média ponderada); ou
  - iii.2) teor maior ou igual a 1% de carvão (por volume, média ponderada); ou

- iii.3) evidências de ocupação humana no passado, na paisagem ao redor, ex. construções, hortas, sambaquis ou geoglifos; e
- iv) menos de 25% (volume, média ponderada) de poros devidos à ação de animais, coprolitos ou outras evidências de atividade animal no solo; e
- v) uma ou mais camadas com espessura combinada de pelo menos 20 cm, **podendo ser horizontes superficiais contínuos desde a superfície ou a espessura combinada de horizontes enterrados.**

Recomenda-se a exclusão do critério de  $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$  no *Pretic horizon* (WRB), pois apesar de 90% dos horizontes antrópicos examinados apresentarem valores acima do limite de  $2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , nos solos de textura arenosa os teores de  $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$  foram abaixo deste limite. Ainda, tendo em vista a condição ambiental na Amazônia, que favorece a intensa remoção de bases, pressupõe-se que o uso agrícola destas áreas, com a exposição do solo pela remoção da vegetação original, facilmente levará ao aumento do percentual de solos que não atenderão a este critério. Ainda, este critério não se apresenta como uma diferencial relevante para outros horizontes antrópicos no WRB, não sendo utilizado em nenhum dos demais horizontes listados. Reclassificando os perfis do acervo com os critérios propostos para o WRB, 84% dos perfis apresentaram horizontes classificados como *Pretic horizon*, em contraste com o valor de 71,4% para TPI usando os critérios vigentes (Tabela 6).

Além da proposta para a identificação do *Pretic horizon*, propõe-se rever a espessura mínima que este horizonte deva ter para que o solo se enquadre no grupo dos *Anthrosols*. Atualmente, no WRB, é necessário ter espessura de pelo menos 50 cm, dentro dos 100 primeiros centímetros do solo. De 77 perfis com dados completos para a classificação, apenas 32 se enquadrariam nos critérios atuais para o grupo *Anthrosols*, representando um percentual de 41% dos perfis no acervo de dados. Com a redução da espessura mínima do *Pretic horizon* de 50 para 30 cm, aumentando a seção de controle para os primeiros 150 centímetros do solo, dos 77 perfis com dados completos 67 foram classificados como *Anthrosols*. Dessa forma, 81% dos perfis se enquadraram como *Anthrosols*, ou seja, quase o dobro do número de perfis de TPIs no acervo.

O número de perfis avaliados e quantos atenderam ou não aos critérios vigentes e modificações propostas para o SiBCS e WRB estão sintetizados na Tabela 6. Ressalta-se que para a avaliação dos critérios que não atenderam, bem como o total de perfis contendo horizontes antrópicos, utilizou-se apenas os perfis com dados completos de todos os atributos, isto é, 77 perfis avaliados. Por exemplo, se o perfil continha os dados de todos os atributos menos cor (ou qualquer outro atributo), então este perfil não foi utilizado para classificar o horizonte A antrópico ou o *Pretic*.

**Tabela 6.** Número total de perfis compilados e avaliados de acordo com os critérios vigentes e propostos do SiBCS e WRB.

SiBCS e WRB	Crítérios Atuais e com Propostas	N. de Perfis	%
<b>Perfis Compilados no Acervo de Dados = 104</b>			
Crítérios vigentes para o horizonte A antrópico no SiBCS (SANTOS et al., 2018)	Sem todos os dados para classificar	27	-
	Com dados <b>completos</b> para classificar os horizontes	77	100%
	Não atende critério de espessura ( $\geq 20$ cm)	3	4%
	Não atende critério do teor de P ( $\geq 30$ mg kg <sup>-1</sup> )	4	5%
	<b>Total de Perfis contendo horizontes A antrópico</b>	<b>70</b>	<b>90%</b>
Proposta de critérios para o horizonte A antrópico no SiBCS	Sem todos os dados para classificar	27	-
	Com dados <b>completos</b> para classificar os horizontes	77	100%
	Não atende critério de espessura ( $\geq 20$ cm)	3	4%
	Não atende critério de cor (valor $\leq 4$ e croma $\leq 3$ )	0	0%
	Não atende critério de teor de P ( $\geq 30$ mg kg <sup>-1</sup> )	4	5%
	Não atende critério de teor de Corg ( $\geq 6$ g kg <sup>-1</sup> )	6	8%
<b>Total de Perfis contendo horizontes A antrópico</b>	<b>65</b>	<b>84%</b>	
Crítérios vigentes para o <i>Pretic horizon</i> no WRB (IUSS WORKING GROUP WRB, 2014)	Sem todos os dados para classificar	27	-
	Com dados <b>completos</b> para classificar os horizontes	77	100%
	Não atende critério de espessura ( $\geq 20$ cm)	2	2,6%
	Não atende critério de cor (valor $\leq 4$ e croma $\leq 3$ )	0	0%
	Não atende critério de teor de Ca + Mg ( $\geq 2$ cmolc kg <sup>-1</sup> )	10	13%
	Não atende critério de teor de P ( $\geq 30$ mg kg <sup>-1</sup> )	5	6,5%
	Não atende critério de teor de Corg ( $\geq 10$ g kg <sup>-1</sup> )	7	9,1%
<b>Total de Perfis contendo <i>Pretic horizon</i></b>	<b>55</b>	<b>71,4%</b>	
Proposta de critérios para o <i>Pretic horizon</i> no WRB	Sem todos os dados para classificar	27	-
	Com dados <b>completos</b> para classificar os horizontes	77	100%
	Não atende critério de espessura ( $\geq 20$ cm)	2	3%
	Não atende critério de teor de P ( $\geq 30$ mg kg <sup>-1</sup> )	5	6,5%
	Não atende critério de teor de Corg ( $\geq 6$ g kg <sup>-1</sup> )	6	8%
<b>Total de Perfis contendo <i>Pretic horizon</i></b>	<b>65</b>	<b>84%</b>	

## 6 CONCLUSÕES

O uso de banco de dados para a avaliação dos atributos diagnósticos dos horizontes superficiais dos solos identificados como TPI permitiu a definição quantitativa de valores limites, os quais, juntamente aos critérios qualitativos já existentes, permitiram a melhor definição do horizonte diagnóstico A antrópico (SiBCS) e do *Pretic horizon* (WRB).

Diante dos padrões analisados nos perfis no banco de dados, são propostas as seguintes alterações de critérios para o A antrópico e *Pretic horizon*: (i) espessura  $\geq 20$  cm, podendo ser horizontes superficiais contínuos desde a superfície ou a espessura combinada de horizontes enterrados; (ii) Corg.  $\geq 6,0$  g kg<sup>-1</sup>; (iii) cor do material do solo com valor  $\leq 4$  e croma  $\leq 3$ , quando úmido; (iv) teores de P maiores ou iguais a 30 mg kg<sup>-1</sup> de solo (Mehlich 1); além dos critérios qualitativos já vigentes de presença de artefatos.

Com a proposta para o SiBCS, incorporando o critério de carbono orgânico e cor, 84% dos perfis compilados no estudo possuem horizontes A antrópicos. A proposta reduz em 7% o número de perfis com horizonte A antrópico em relação ao critério vigente do SiBCS, porém acrescenta critérios importantes para a diferenciação deste horizonte, que permitem melhor identificação das TPIs.

Por outro lado, com a proposta para o WRB, excluindo o critério de teor mínimo de Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> e compatibilizando com os critérios do SiBCS, 84% dos perfis também possuem *Pretic horizon*. A proposta aumenta em 13% o número de perfis compilados nesse estudo contendo horizontes *Pretic* em relação à proposta vigente.

Para o WRB, no grupo de solos de referência dos *Anthrosols*, propõe-se a redução da espessura do *Pretic horizon* de 50 para 30 cm, e alteração da seção de controle para dentro dos primeiros 150 centímetros do solo, combinados ou contínuos a partir da superfície. Com os critérios atuais do WRB, apenas 41% dos perfis no banco de dados eram definidos como *Anthrosols*, com a proposta de mudanças de limites de espessura, 81% dos perfis se enquadraram nesse grupo de solos de referência.

## **CAPÍTULO III**

### **SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA EM CAMADAS DE SOLOS COM E SEM INFLUÊNCIA ANTRÓPICA: ESTUDO PRELIMINAR NO CAMPO EXPERIMENTAL DO CALDEIRÃO, MUNICÍPIO DE IRANDUBA (AM)**

## 1 RESUMO

A susceptibilidade magnética (SM) é a grandeza que representa quantitativamente a resposta magnética do material a um dado campo magnético aplicado. No solo a SM é influenciada pelo material de origem ou material adicionado, e se origina de processo de oxidação ou do aumento da temperatura, por exemplo por meio do uso do fogo. Sua magnitude é influenciada pela mineralogia, quantidade, forma e tamanho dos minerais. Estudos arqueológicos vêm mostrando o potencial do uso da SM para caracterizar, identificar e até mapear áreas de Terra Preta de Índio (TPI), devido às anomalias causadas nesses solos pelo seu aquecimento, na presença de matéria orgânica, com o uso do fogo pelas populações pré-Colombianas. Porém, estudos envolvendo a SM em solos antrópicos e na região Amazônica ainda são escassos. Por isso, o objetivo deste trabalho foi analisar a magnitude da SM em amostras de solos antrópicos e não antrópicos, assim como analisar a correlação da SM a outros atributos do solo. Foram utilizados 52 perfis de solo provenientes do Campo Experimental de Pesquisa do Caldeirão (Embrapa Amazônia Oriental) no município de Iranduba, AM. As amostras de solo foram coletadas em camadas (0 a 20, 20 a 40, 40 a 60, 60 a 80, 80 a 100 cm) e diferenciadas entre camadas de solos antrópicos e não antrópicos. Os resultados da SM para as camadas antrópicas foram significativamente maiores que os resultados da SM nas camadas não antrópicas. A correlação de Pearson entre a SM e os atributos do solo também mostraram diferenças entre as camadas antrópicas e não antrópicas. Embora preliminares devido ao número amostral de perfis, os resultados mostram que a SM tem potencial de identificação de áreas de TPI no campo, assim encorajando futuras pesquisas no tema. Há necessidade de estudo mais amplo sobre a magnitude e variação da SM, em solos antrópicos e não antrópicos, com diferentes classes de textura e originados de diferentes materiais, para definir índices de referência para melhor interpretação dos dados.

**Palavras-chave:** Propriedade magnética em solos. Solos antrópicos. Indicadores de ocupação humana em solos.

## 2 ABSTRACT

Magnetic susceptibility (MS) is a measurement that quantitatively represents a material's magnetic response to an applied magnetic field. The MS of the soil is influenced by the parental material or to added material, and it originates from the oxidation process or by increasing the temperature, for example, through the use of fire. Its magnitude is influenced by the mineralogy, quantity, shape, and size of the minerals. Archaeological studies have shown the potential of using MS to characterize, identify and even to map areas of *Terra Preta de Índio* (TPI), due to the anomalies caused in these soils by heating, in the presence of organic matter, with the usage of fire by pre-Colombian populations. However, studies of anthropic soils in the Amazon region involving MS are still scarce. Therefore, the objective of this work was to analyze the magnitude of MS in samples from anthropic and non-anthropic soils, as well as to analyze the correlation of MS with other soil attributes. Fifty-two soil profiles from the Caldeirão Experimental Research Field (Embrapa Amazônia Oriental) in the municipality of Iranduba, AM, were used. The samples were taken by layers (0 to 20, 20 to 40, 40 to 60, 60 to 80 and 80 to 100 cm) and separated in anthropic and non-anthropic soil materials. The MS results for the anthropic layers were significantly higher than the non-anthropic layers. Pearson's correlation between MS and soil attributes also showed differences between the anthropic and non-anthropic layers. Although preliminary due to the sample number of profiles, the results show that MS has the potential to identify areas of TPI, thus encouraging future research on the topic. There is a need for a broader study on the magnitude and variation of MS, in anthropic and non-anthropic soils, with different classes of texture and originating from different materials, to define reference indexes for a better interpretation of the data.

**Keywords:** Magnetic property in soils. Anthropic soils. Indicators of human occupation in soils.

### 3 INTRODUÇÃO

Os minerais presentes nas rochas, nos solos e nos sedimentos podem apresentar a propensão em se magnetizar na presença de um campo magnético. Essa propriedade é chamada de susceptibilidade magnética (SM) e sua magnitude depende de algumas características dos minerais, tais como a composição, a estrutura espacial do cristal e o seu tamanho (VEROSUB; ROBERTS, 1995).

Em solos tropicais pode haver presença de óxidos de ferro, magnéticos e não magnéticos, nos minerais (RESENDE; SANTANA; REZENDE, 1988). Esses minerais ferrimagnéticos, possuem alta capacidade de se magnetizarem na presença de um campo magnético externo, como ocorre com a maghemita e magnetita (MATIAS, 2010). Sua ocorrência no solo se deve ao material de origem, como é o caso da magnetita, ou pelo processo de oxidação da magnetita, formando a maghemita (BARRN; TORRENT, 2002). Além disso, Mullis (1977), Schwertmann e Cornell (2008) também relatam a formação de maghemita no solo pela queima de materiais com outros óxidos de ferro, como goethita e a hematita, na presença de material orgânico.

A avaliação da SM nos minerais do solo vem sendo usada no Brasil, para o entendimento dos processos de pedogênese, indicando o material de origem e na identificação de depósitos aluvionares e coluvionares (KÄMPF; CURI, 2000). Camêlo (2013) quantificou a SM em amostras de Latossolos Vermelhos férricos e perférricos desenvolvidos em diferentes materiais de origem no Estado de Minas Gerais; enquanto Souza Junior et al. (2010) determinaram a SM dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. Rossi et al. (2018) avaliaram a SM e sua relação com os teores de ferro total de solos no estado de Rondônia; já Teixeira et al. (2018) mostraram o potencial da SM em distinguir os diferentes solos em levantamentos pedológicos e também a SM em solos antrópicos (i.e., TPI).

Estudos arqueológicos e pedológicos vêm utilizando a SM como indicadora de anomalias no solo causadas pelo seu aquecimento (ARROYO-KALIN, 2009; SCHMIDT, 2013; SÖDERSTRÖM et al., 2016; TEIXEIRA et al., 2017b), fenômeno conhecido como termoremanência. No entanto, trabalhos envolvendo a SM em solos no Brasil ainda são escassos, principalmente em solos antrópicos, como as Terras Pretas de Índio (TPI). Portanto, tendo em vista as evidências de uso do fogo pelas populações pré-Colombianas (SOMBROEK, 1966; TEIXEIRA, 2007) e a intensa deposição de matéria orgânica nesses solos, pressupõe-se que a SM pode ser um atributo útil na identificação das TPI. Além disso, como a medição da SM em solos pode ser feita de forma simples, não destrutiva e no campo, por meio de medidores portáteis, esta pode ser uma técnica importante para evitar maiores modificações do solo em sítios arqueológicos de TPI.

Sendo assim, este trabalho preliminar teve como objetivo desde trabalho foi analisar a SM em amostras de solo obtidas em camadas de perfis identificados como antrópicos e não antrópicos, localizados no Campo Experimental de Pesquisa do Caldeirão (Embrapa Amazônia Oriental), município de Iranduba, AM; assim como analisar a correlação da magnitude dos valores de SM com alguns atributos químicos e com a granulometria das amostras de solo. Com esse diagnóstico pretende-se ainda estimular futuras pesquisas relacionadas ao tema.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo e seleção das amostras

As amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) utilizadas para este estudo fazem parte do material já investigado por Alho et al. (2019), sendo a área localizada no Campo Experimental de Pesquisa do Caldeirão (Embrapa Amazônia Oriental), no município de Iranduba, AM. O campo experimental situa-se à margem esquerda do Rio Solimões, distando 16 quilômetros do porto de Cacau-Pirêra, no Rio Negro, na margem oposta em relação a capital, Manaus.

Dentre as amostras coletadas anteriormente na área de estudo (ALHO et al., 2019), foram selecionados 52 pontos e amostras dentro de cinco profundidades (0 a 20, 20 a 40, 40 a 60, 60 a 80, 80 a 100 cm), excluindo-se amostras que não são de horizonte A, compondo um total de 249 camadas. Nessas amostras, Alho et al. (2019) aplicaram os critérios vigentes do WRB (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015) para distinção das camadas do solo em *pretic* ou *non-pretic*. Utilizando a classificação correspondente no SiBCS, nesse estudo, as camadas foram identificadas em dois grupos - antrópicas e não antrópicas, respectivamente para *pretic* ou *non-pretic*. Do total de 249 camadas, 53 foram identificadas como não antrópicas e 196 como antrópicas, as quais foram usadas para a mensuração da SM e comparação dos resultados.

### 4.2 Análise da susceptibilidade magnética (SM)

As análises de SM foram realizadas em laboratório da Embrapa Solos usando o susceptímetro – condutímetro modelo KT 10 S/C (Terraplus, Canadá). Para a medição da SM, as amostras foram colocadas em placas de Petri de 9 cm de diâmetro à uma espessura de 1,0 cm. O aparelho KT 10 foi previamente ajustado na função *sample mesure*, com a geometria corrigida para o diâmetro da placa Petri. As avaliações foram realizadas em triplicata e o resultado final é obtido por média aritmética (TEIXEIRA et al., 2018). A SM é uma propriedade adimensional de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (DE ALMEIDA, 1997) e em todo o trabalho é representada na ordem de grandeza de  $10^{-3}$ .

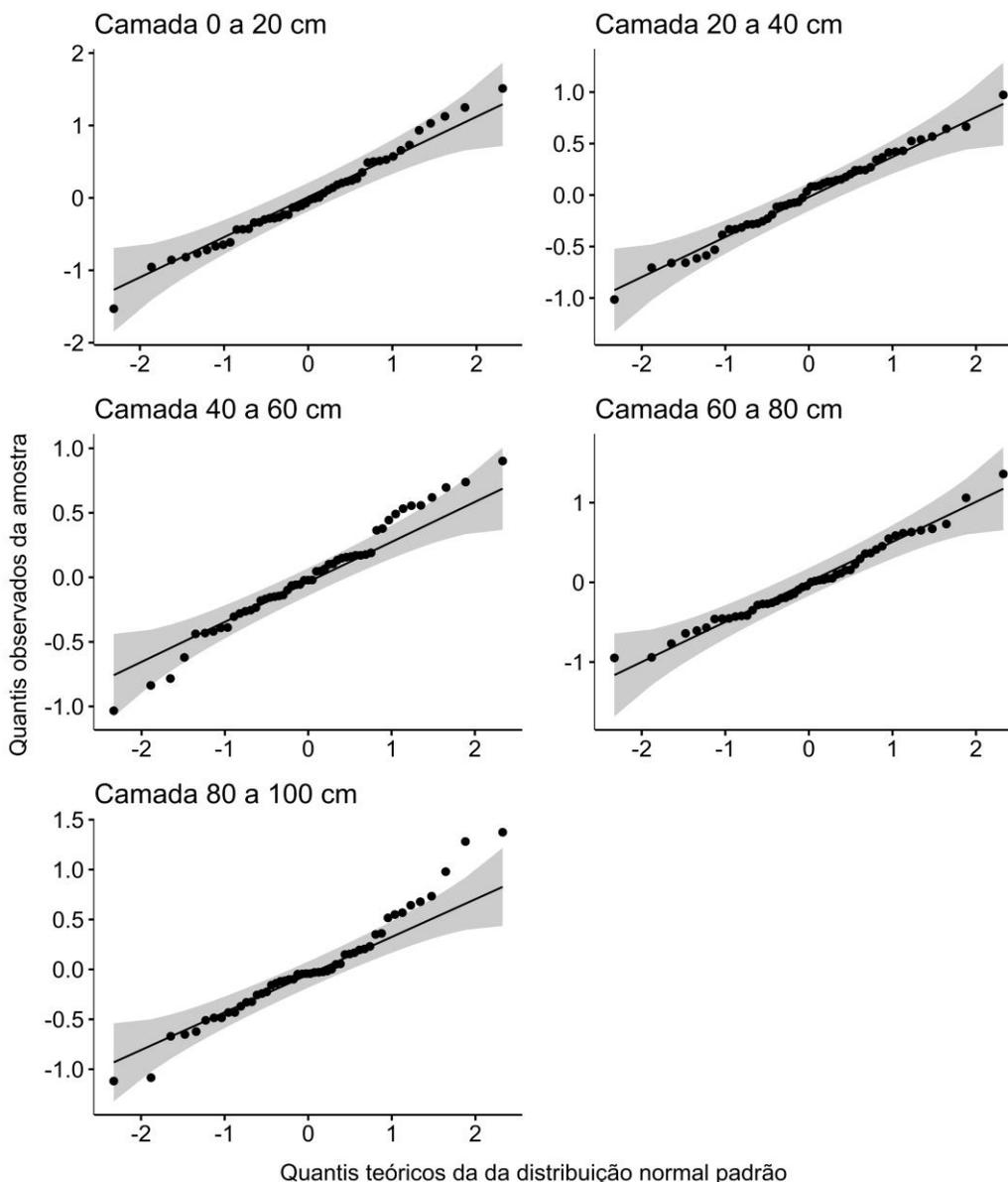
### 4.3 Análise dos dados

Os resultados de SM foram comparados em função da profundidade de ocorrência das camadas e quanto a identificação como antrópica ou não antrópica. Primeiro, os valores de SM foram separados por camadas (i.e., 0 a 20, 20 a 40, 40 a 60, 60 a 80, 80 a 100 cm) e os dados em cada uma avaliados quanto a normalidade. Apenas a camada de 0 a 20 cm apresentou normalidade (Shapiro Wilk,  $p > 0,05$ ), assim as demais foram devidamente transformadas utilizando logaritmo e, após essa etapa, todas apresentaram normalidade pelo teste de Shapiro Wilk,  $p > 0,05$  (Tabela 7).

Os gráficos de QQPlot confirmaram a normalidade dos dados (Figura 19), onde espera-se obter uma linha reta interceptando o eixo y em zero e inclinação de 1 como a inferência da normalidade dos dados satisfeitos (PETER, 2002).

**Tabela 7.** Teste de Shapiro Wilk ( $p > 0,05$ ) para a normalidade dos dados de SM por camadas.

Camadas	Teste Shapiro Wilk
0 – 20	0,91
20 – 40	0,98
40 – 60	0,76
60 – 80	0,62
80 – 100	0,14



**Figura 25.** Gráfico Q-QPlot para a normalidade dos dados de SM por camada.

Os valores de SM das camadas identificadas como antrópicas e não antrópicas foram comparados utilizando o teste t Student (STUDENT, 1908), por camada. Para a visualização dos resultados da SM, cada camada (antrópica e não antrópica) foi apresentada utilizando gráfico tipo *boxplot* (TUKEY, 1977).

Os *boxplots* apresentados agrupam um conjunto de cinco análises estatísticas básicas. O retângulo do *boxplot* representa o intervalo interquartil (IQR), que é a diferença entre o percentil 75% (Q3) ou também conhecido como terceiro quartil, e o percentil 25% (Q1) ou primeiro quartil. A linha horizontal dentro do retângulo representa a mediana, também conhecida como percentil 50%. As linhas verticais fora do retângulo representam os valores máximos e mínimos dentro do intervalo definido pelo critério de Tukey, no qual excluem-se valores atípicos chamados de *outliers*. Esse intervalo entre máximo e mínimo (excluindo os *outliers*) é definido através do IQR, no qual o valor mínimo =  $Q1 - (1,5 * IQR)$ ; e o valor máximo =  $Q3 + (1,5 * IQR)$ . Os *outliers* são representados por pontos (COLEMAN, 2015; TUKEY, 1977). Todas as análises foram feitas utilizando o programa R (R CORE TEAM, 2013), incluindo a análise de variância.

#### 4.4 Análise de correlação entre a SM e atributos do solo

Além do teste t de Student, a magnitude dos valores de SM foi correlacionada à alguns atributos químicos e a granulometria das amostras de solo. Foram utilizados dados secundários das mesmas amostras selecionadas para a medida da SM (dos mesmos perfis e mesmas profundidades), provenientes do trabalho de Alho et al. (2019).

Os atributos do solo utilizados foram: granulometria e teores de P, K, Na, Fe, Zn, Mn, Cu, Ca, Mg, Al e H; pH em água; CTC e Corg. Nos dados originais, os teores de P, K e Na extraíveis foram determinados por Mehlich 1; Ca e Mg trocável por KCl 1 M; e H + Al foram determinados por acetato de cálcio e cálcio 0,5 M a pH 7,0. O pH do solo foi determinado na água (razão solo: água de 1: 2,5). A Soma de Bases (SB) foi calculada a partir da soma dos valores dos cátions trocáveis (K, Na, Ca e Mg); sendo a Capacidade de Troca de Cations (CTC) (a pH = 7,0) calculada a partir da soma do valor de SB mais o da acidez (H + Al). O teor de argila foi determinado pelo método de pipeta após a remoção da matéria orgânica com peróxido de hidrogênio e Corg pelo método Walkey Black. Os métodos utilizados por Alho et al. (2019) para as análises dos atributos acima citados, estão descritos no Manual de Métodos de Análise de Solos da Embrapa (2017a).

Para a avaliação dos resultados, primeiramente, foi desenvolvida uma matriz de correlação de Pearson entre a SM e os dados de granulometria (argila), P, K, Na, Fe, Zn, Mn, Cu, Ca, Mg, Al e H, CTC, Corg. e pH, sem a separação de resultados por profundidade das camadas ou entre antrópicos e não antrópicos. A partir da matriz gerada, foram selecionados os atributos que tiveram correlação maior que 0,50 (i.e., 50%) para elaborar uma nova correlação de Pearson, só que agora separando os dados entre camadas antrópicas e não antrópicas, ainda de acordo com a classificação realizada por Alho et al. (2019). Os atributos selecionados para a correlação com a SM nesta etapa foram: CTC, Corg, Argila, P, Ca, Cu, SB, Zn, Mn e Fe.

O resultado foi apresentado por meio de análise visual de correlação em rede (*network visualizations of relationships data analysis*), utilizando o programa R (R CORE TEAM, 2013) com os pacotes *qgraph* (EPSKAMP et al., 2012), *tidyverse* (WICKHAM; WICKHAM, 2017) e *corpcor* (SCHAFER et al., 2017).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Susceptibilidade magnética (SM)

Os valores da estatística descritiva básica dos dados de SM das camadas antrópicas e não antrópicas estão apresentados na tabela 8 e os *boxplots* dos valores de SM ( $10^{-3}$  SI) nas diferentes profundidades, também separadas entre antrópicas e não antrópicas, são ilustrados na figura 20. Em todas as 5 profundidades, os valores de SM para as camadas antrópicas foram maiores que para as camadas não antrópicas.

**Tabela 8.** Estatística descritiva da SM ( $10^{-3}$  SI) das camadas antrópicas e não antrópicas.

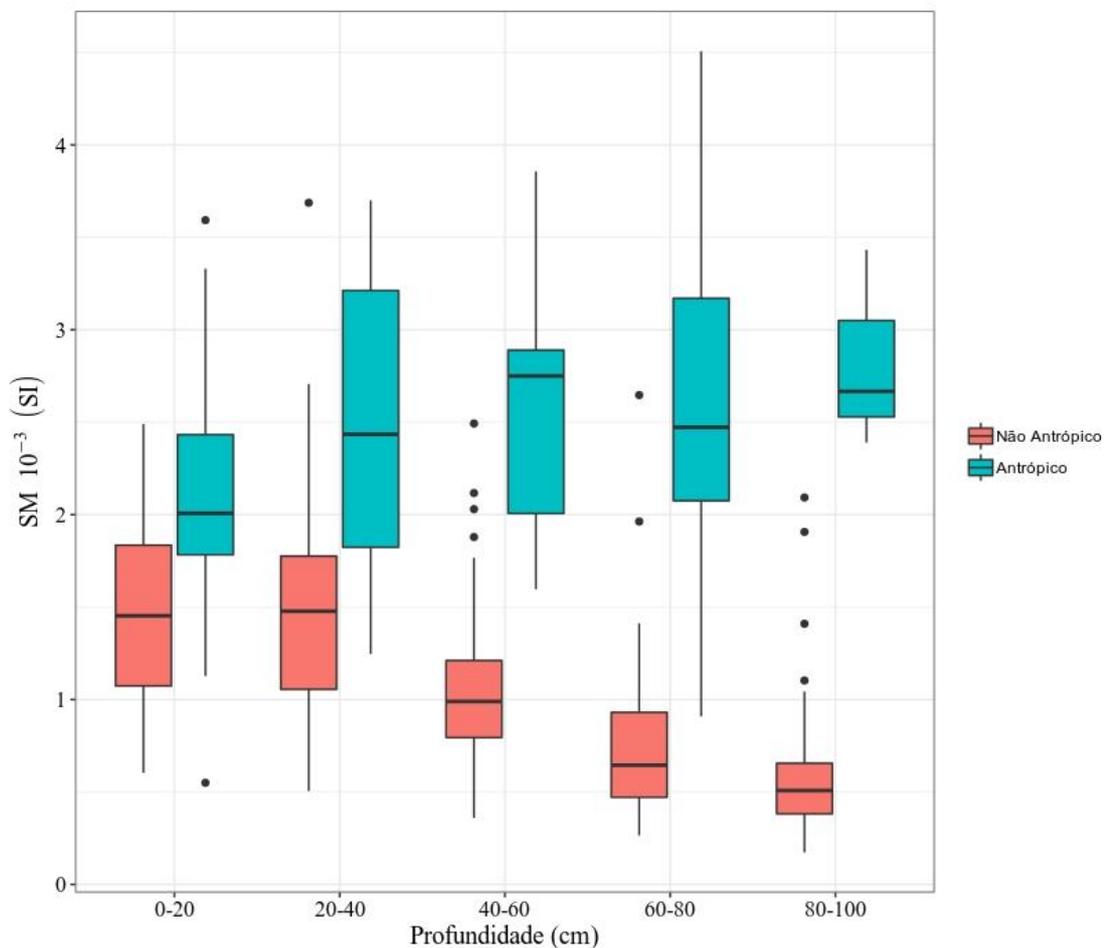
Camadas	Profundidade cm	Valores de SM (adimensional)				
		Mediana	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Antrópica	0 – 20	2,01	2,08	0,6937	0,55	3,593
Não Antrópica	0 – 20	1,45	1,46	0,544	0,603	2,49
Antrópica	20 – 40	2,44	2,54	0,8394	1,247	3,7
Não Antrópica	20 – 40	1,48	1,52	0,6643	0,505	3,687
Antrópica	40 – 60	2,75	2,57	0,7628	1,597	3,857
Não Antrópica	40 – 60	0,99	1,10	0,473	0,36	2,493
Antrópica	60 – 80	2,47	2,62	1,2262	0,909	4,507
Não Antrópica	60 – 80	0,65	0,77	0,4565	0,265	2,647
Antrópica	80 – 100	2,67	2,83	0,5402	2,39	3,433
Não Antrópica	80 – 100	0,51	0,61	0,3895	0,173	2,093

Todas as amostras de camadas antrópicas apresentaram diferença significativa em relação às não antrópicas. Os valores de *p-value* do teste t de student foram de 0,001176; 0,000182; 0,000038; 0,001738 e 0,000111, respectivamente para as camadas de 0 a 20, 20 a 40, 40 a 60, 60 a 80, 80 a 100 cm.

Pela análise dos dados e do *boxplot*, pode-se observar que a SM é significativamente maior nas amostras de camadas antrópicas que nas não antrópicas. Isso indica que as práticas usadas nos solos pelas populações antigas, que formaram as TPI, foram capazes de alterar o comportamento magnético dos minerais, alterando e aumentando a SM.

O uso de fogueiras e fornos de queima de cerâmicas nesses sítios arqueológicos, com a elevação da temperatura do solo, diante da presença de minerais antiferromagnéticos e de material orgânico abundante (depositados pelos povos pré-Colombianos), transforma o comportamento dos minerais do solo e aumenta a sua SM (DEARING, 1999). Os elevados valores de SM nas amostras de solo identificadas como antrópicas neste estudo, corroboram os dados de outros autores, também estudando SM em TPI (ARROYO-KALIN, 2009; OLIVEIRA et al., 2015; ROSSI et al., 2018; SÖDERSTRÖM et al., 2016; TEIXEIRA et al., 2018).

Em estudos com 15 perfis de solos provenientes do Estado de Rondônia, Teixeira et al. (2018) e Rossi et al. (2018), identificaram elevada SM em apenas dois perfis. Dentre esses, um se tratava de Argissolo Vermelho com horizonte A antrópico; no qual o maior valor de SM foi atribuído ao efeito do aquecimento do solo, fenômeno conhecido como magnetização termo remanente (STERNBERG; SPARKS; KNUDTSON, 2008). O segundo perfil com elevados valores de SM (TEIXEIRA et al., 2018) é classificado como Nitossolo Vermelho Eutroférico. Nesse caso não foi identificado o horizonte A antrópico e a elevada SM foi atribuída ao material de origem (composto de granulitos básicos e anfíbolitos do Grupo Nova Brasilândia), sendo identificados altos teores de ferro no solo e expressiva presença de minerais magnéticos na fração areia. Esses resultados corroboram a informação de que a SM é influenciada não só pelo material de origem, mas também pelo efeito de elevadas temperaturas, como ocorre nas TPI.



**Figura 26.** *Boxplots* dos valores de SM ( $10^{-3}$  SI) nas camadas com diferentes profundidades e separadas entre antrópicas e não antrópicas.

O aquecimento pode transformar os minerais, como exemplo da hematita para magnetita, se temperaturas de cerca de 500 °C forem atingidas e em presença de matéria orgânica, onde há condições de reduzida presença de oxigênio (MARMET et al., 1999). A presença de magnetita é responsável pelo aumento da SM no solo, sendo a sua formação atribuída ao fenômeno termo remanente. Tendo sido observada em áreas de habitações ou acampamentos antigos onde o uso de fogueiras para o cozimento de alimentos e aquecimento

era prática frequente, em especial no material de solo sob as áreas de fogueira ou fornos de queima de cerâmica (TEIXEIRA et al., 2018).

Observa-se que a SM aumenta com a profundidade para as camadas antrópicas e o inverso ocorre nas camadas não antrópicas (Figura 20). O uso do solo pelas populações pré-Colombianas contribuiu para a formação de solos antrópicos espessos, contendo não só artefatos, mas também propriedades químicas (i.e., P e Corg) diferenciadas no decorrer dos anos, incluindo a elevada SM (ARROYO-KALIN, 2009; OLIVEIRA et al., 2015; SÖDERSTRÖM et al., 2016; TEIXEIRA et al., 2018).

Em geral, as TPI apresentam horizontes superficiais (A Antrópico) com maior espessura que os horizontes superficiais de solos não antrópicos adjacentes, chegando a profundidades maiores que 100 cm (capítulo 2 desta dissertação) nas TPIs. Assim, a expressão dos processos de adição e melanização que levam a formação dos horizontes antrópicos na TPI se manifesta em maior profundidade no perfil. Já nos solos não antrópicos outros processos, como a perda e translocação de argila e material orgânico, conduzem a diferenciação de horizontes superficiais e subsuperficiais. Assim, o reconhecimento de um padrão de distribuição e a magnitude dos valores de SM podem ser usados, para diferenciar as TPIs de outros solos sem horizonte antrópico em uma dada área.

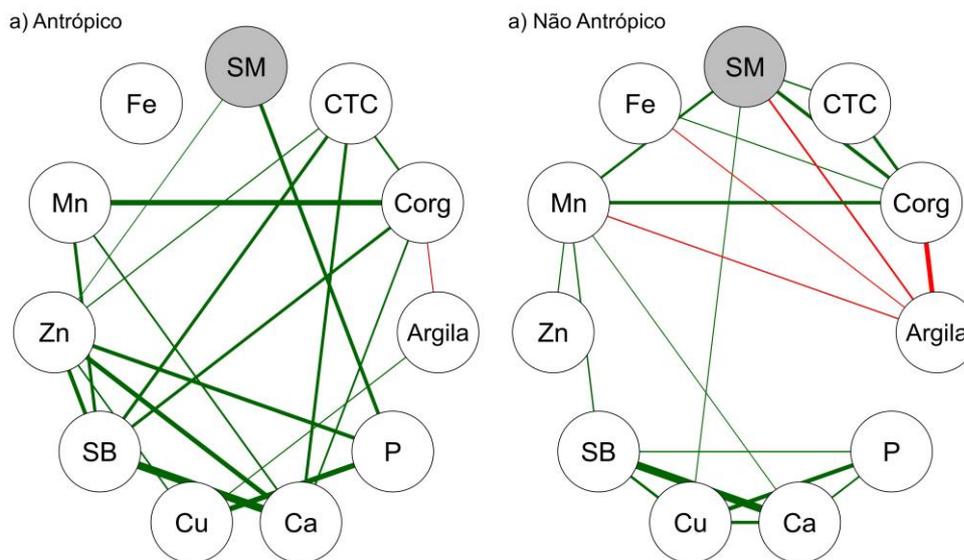
No geral, as camadas de solo não antrópicas apresentaram maiores quantidades de dados que foram *outliers* que as camadas antrópicas (Figura 20). Isso pode decorrer do fato de que se trata de estudo realizado com materiais de solo de diferentes profundidades englobando diferentes perfis, com variação de processos pedogenéticos. O menor número de *outliers* nas camadas antrópicas pode indicar a maior homogeneidade da SM, devido a maior influência das práticas de uso das populações pretéritas nesse sítio arqueológico.

De acordo com Marmet et al. (1999) a avaliação da SM tem o potencial de elucidar questões sobre efeitos do aquecimento ou não de sedimentos e artefatos encontrados em sítios arqueológicos. Os poucos trabalhos citados e os resultados encontrados neste estudo reforçam que avaliações mais elaboradas da variação da SM são importantes, pois poderia constituir um atributo do solo a ser incorporado na identificação de TPI, principalmente por ser passível de medição no campo e não destrutiva.

## 5.2 Correlação entre a SM e atributos do solo

A visualização da correlação em rede entre a SM e os atributos do solo como CTC, Corg, Argila, P, Ca, Cu, SB, Zn, Mn e Fe é apresentada na figura 21. As variáveis correlacionadas estão indicadas em círculos, sendo a SM destacada no círculo cinza, com linha verde para correlações com valores positivos e vermelha para negativos. Apenas as correlações acima de 0,50 são ilustradas e a espessura da linha é proporcional a sua intensidade.

A rede de correlação se mostrou diferente entre as amostras de solo das camadas antrópicas e não antrópicas. Nas camadas antrópicas, houve correlação positiva e elevada entre a SM e teores de P e Zn (Figura 21a). Esses nutrientes, por sua vez, apresentaram elevada correlação com atributos relacionados a fertilidade do solo, tais como: CTC, Corg, Ca, SB e outros micronutrientes. Por outro lado, na rede de correlação das camadas não antrópicas (Figura 21b) houve elevada correlação negativa entre a SM e a Argila, com elevada correlação positiva entre a SM e o Corg, o Mn, a CTC e o Cu (em ordem de importância).



**Figura 27.** Visualização da correlação em rede entre a SM e alguns atributos de camadas de solos antrópicos (a) e não antrópicos (b).

Esses resultados indicam correlação entre a SM teores de nutrientes nos solos, como P, Mn, Zn e Cu. Essas correlações corroboram com estudos de Oliveira et al. (2015) e Siqueira (2010), que também evidenciaram a relação entre a SM e atributos do solo. Porém, a correlação observada da SM com o P e o Zn pode ser apenas espúria, pois em solos antrópicos a presença de nutrientes, como P, Zn e Mn, é elevada pelo aporte de restos de cerâmicas e ossos, assim como é aumentada a SM pelas práticas adotadas pelas comunidades pré-Colombianas. Como ambas as características são relativas ao uso do solo pelas populações antigas que habitavam essas áreas de TPI, é esperado que ocorra correlação entre SM e nutrientes.

Vale destacar que a baixa variação dos teores de argila nas amostras de solo nas camadas antrópicas pode explicar o fato de não se observar correlação significativa entre a argila e a SM. Por outro lado, nos solos de amostras de camadas não antrópicos houve correlação negativa entre a SM e o teor de argila, ou seja, a SM foi maior em camadas com menores teores de argila. Destaca-se que para ambas as camadas (antrópicas e não antrópicos) não houve correlação significativa entre a SM e os teores de Fe, indicando que a variação dos teores de Fe nos minerais ferrimagnéticos é baixa nos perfis estudados. Por isso, é importante avaliar se ocorrem correlações entre SM e Fe, assim como SM e argila, em diferentes regiões e em solos com maior variação dos dados.

Há diferença significativa ( $p > 0,05$ ) entre a SM em todas as camadas, diferenciando as camadas antrópicas das não, bem como a correlação entre a SM e os atributos do solo avaliados, indicaram que a SM é ferramenta útil para auxiliar na identificação e delimitação de tipos de solos e, portanto, no mapeamento de solos, principalmente para as TPI, como já reportado por vários autores (MATIAS, 2010; OLIVEIRA et al., 2015; SIQUEIRA, 2010; TEIXEIRA et al., 2018). Portanto, estudos futuros devem ser feitos quanto às variações das SM nos diversos solos TPI na Amazônia, estabelecendo valores limites para sua identificação e quantificação da expressão geográfica.

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, pode-se observar que há uma diferença significativa da SM em camadas de solos com horizonte A antrópico de não antrópicos.

A correlação observada entre os valores da SM e de atributos do solo permite inferir que a SM é uma ferramenta útil para a caracterização e identificação no campo de solos com horizonte A antrópico.

Devido ao potencial de uso da SM para o mapeamento de solos com horizonte A antrópico, recomenda-se o fortalecimento de estudos futuros com a aplicação da técnica, pela sua rapidez e o fato de ser um método não destrutivo, o que é ainda mais importante pela importância arqueológica desses solos.

Por fim, há necessidade de estudos com maior número de dados ou sítios, para avaliar a variação da SM em solos antrópicos e não antrópicos, para definir valores de referência e permitir sua melhor interpretação.

## CONCLUSÕES GERAIS

O estudo abordou o desenvolvimento de funções de pedotransferência (FPT ou PTF para *pedotransfer function*, em inglês) para padronização de unidades de atributos químicos do solo e harmonização de banco de dados de solos identificados como Terra Preta de Índio (TPI); bem como a validação e proposição de critérios de classificação para o horizonte A antrópico no SiBCS e para o *Pretic horizon* no WRB, a partir do banco de dados de TPIs. Ainda, compreendeu avaliação preliminar sobre a suscetibilidade magnética (SM) em amostras de solos identificadas como antrópicas e não antrópicas, originadas de estudo anterior no Campo Experimental de Pesquisa do Caldeirão, município de Iraduba (AM).

As FPTs foram obtidas através do método de regressões não lineares, utilizando as variáveis preditivas: areia total, argila ou carbono orgânico. As funções permitiram a conversão dos atributos químicos do solo obtidos na base gravimétrica pra a base volumétrica e vice-versa. A FPT que apresentou a maior precisão para prever a densidade da terra fina, essencial para a conversão dos dados, foi a que apresenta teor de areia total como preditor (FPT1), apresentando o menor RSE de  $0,092 \text{ g cm}^{-3}$ .

A partir das FPTs foi possível padronizar o banco de dados contendo informações sobre os solos identificados na literatura como TPIs. Diante dos padrões analisados nos perfis no banco de dados, foram propostos novos critérios de classificação para o horizonte A antrópico no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) e o *Pretic horizon* no *World Reference Base for Soil Resource* (WRB). Com a proposta para o SiBCS, incorporando os critérios de teor de carbono orgânico e de cor, 84% dos perfis contém horizontes A antrópicos. A proposta reduz em 7% o número de perfis com horizonte A antrópico em relação ao critério vigente do SiBCS, porém a proposta conta com critérios importantes para diferenciar solos com esse horizonte.

Por outro lado, com a nova proposição de critérios para o WRB, 84% dos perfis passam a ter *Pretic horizon*, aumentando em 13% o número de perfis em relação aos critérios vigentes. Ainda para o WRB, no grupo de referência dos *Anthrosols*, foi proposta a redução da espessura do *Pretic horizon* de 50 para 30 cm, bem como alteração da seção de controle para observação, passando a ser dentro dos primeiros 150 centímetros do solo, combinados ou contínuos a partir da superfície. Com os critérios atuais do WRB, apenas 41% dos perfis no banco de dados eram definidos como *Anthrosols*, com a proposta 81% dos perfis se enquadraram nesse grupo de solos de referência.

Em relação ao estudo preliminar da SM em camadas de solos identificadas como antrópicas e não antrópicas, foram observados valores maiores de SM para as antrópicas, com diferença significativa para as não antrópicas. Além disso, a correlação observada entre os valores da SM e de atributos do solo permite inferir que a SM é uma ferramenta útil para a caracterização e identificação no campo de solos com horizonte A antrópico. Por fim, recomenda-se mais estudos com maior número de perfis, em condições ambientais e constituídos de materiais de origem distintos, para fortalecer o uso da SM como marcador de TPIs. Uma vez que, a avaliação da SM em TPIs, por sensores proximais traz vantagens pela rapidez, por ser um método não destrutivo e menos laborioso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALHO, C. F. B. V.; SAMUEL-ROSA, A.; MARTINS, G. C.; HIEMSTRA, T.; KUYPER, T. W.; TEIXEIRA, W. G. Spatial variation of carbon and nutrients stocks in Amazonian Dark Earth. *Geoderma*, v. 337, p. 322–332, 1 mar. 2019.
- AQUINO, R. E. DE; MARQUES, J.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A. DE; BAHIA, A. S. R. DE S.; SANTOS, L. A. C. DOS. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. *Geoderma*, v. 262, p. 35–44, 15 jan. 2016.
- ARROYO-KALIN, M. Steps Towards an Ecology of Landscape: The Pedo-Stratigraphy of Anthropogenic Dark Earths. In: WOODS, W. I.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; STEINER, C.; WINKLERPRINS, A.; REBELLATO, L. (Eds.). **Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. p. 33–83.
- ARROYO-KALIN, M. The Amazonian Formative: Crop Domestication and Anthropogenic Soils. *Diversity*, v. 2, n. 4, p. 473–504, abr. 2010.
- ARROYO-KALIN, M. A. **Steps towards an ecology of landscape: A geoarchaeological approach to the study of anthropogenic dark earths in the central Amazon region, Brazil**. PhD Thesis—[s.l.] University of Cambridge Cambridge, UK, 2008.
- BAQUERO, O. **ggsm: North Symbols and Scale Bars for Maps Created with 'ggplot2' or 'ggmap'**. R package version 0.4. 0. [s.l: s.n.].
- BARRN, V.; TORRENT, J. Evidence for a simple pathway to maghemite in Earth and Mars soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 66, n. 15, p. 2801–2806, 1 ago. 2002.
- BATISTA, K.; LUMBRERAS, J.; COELHO, M.; DE OLIVEIRA, V.; DO VALE JÚNIOR, J. Guia de campo da XI Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Roraima. **Embrapa Roraima-Livro científico (ALICE)**, 2018.
- BEAUDETTE, D.; ROUDIER, P. **aqp: Algorithms for quantitative pedology**. R package version 0.99-5. [s.l: s.n.].
- BECKER, R. A.; WILKS, A. R.; BROWNRIGG, R. **mapdata: extra map databases**. R package version 2.2-6. [s.l: s.n.].
- BECKER, R. A.; WILKS, A. R.; BROWNRIGG, R.; MINKA, T. P.; DECKMYN, A. **maps: Draw geographical maps**. R package version, v. 2, 2013.
- BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*, v. 139, n. 1, p. 90–97, 15 abr. 2007.
- BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G.; TASSINARI, W. DE S.; MENEZES, M. D. DE; VALLADARES, G. S.; ANJOS, L. H. C. DOS; BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G.; TASSINARI, W. DE S.; MENEZES, M. D. DE; VALLADARES, G. S.; ANJOS, L. H. C. DOS. Bulk Density Prediction for Histosols and Soil Horizons with High Organic Matter Content. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 41, 2017.
- BUDIMAN, M.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA, M. DE L.; SANTOS, H. G. DOS. Revisão sobre Funções de Pedotransferência (PTFs) e Novos Métodos de Predição de Classes e Atributos do Solo. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do Solo**, p. 50, 2003.

BUURMAN, P.; VAN LAGEN, B.; VELTHORST, E. **Manual for soil and water analysis**. Department of Soil Science and Geology of the Wageningen Agricultural University - Netherlands: Backhuys, 1996.

CAMÊLO, D. DE L. Mineralogia, suscetibilidade magnética e teores de fósforo e de elementos traço em Latossolos férricos e perférricos de Minas Gerais. 8 fev. 2013.

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**, v. 70, n. 3, p. 598–609, 2011.

CARDOSO, L. E.; CRISPIM, S. M. A.; FILHO, A. C.; LUMBRERAS, J. F.; MOTTA, P. E. F.; ARAÚJO, A. R.; FERNANDES, A. H. B. M.; JACOMINE, P. K. T.; FERNANDES, F. A.; COELHO, M. R.; CALDERANO, S. B.; SHINZATO, E.; SOARES, M. T. S. **X Reunião Brasileira de Classificação de Solos: Pantanal e Cerrado. Guia de Campo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012.

CAVASSANI, R. DE S. **Caracterização e Classificação de Terras Pretas de Índio no Sul do Estado de Rondônia**. Dissertação (Mestrado)—Seropédica, RJ: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2018.

CESÁRIO, F. **Funcionamento e Propriedades Ecológicas Da Vegetação e Dos Solos Na Floresta Tropical Amazônica**. Doutorado [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

COLEMAN, D. **Box Plot with Minitab**. Disponível em: <<https://www.leansigmacorporation.com/box-plot-with-minitab/>>. Acesso em: 4 jan. 2020.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo-Núcleo Regional Sul**, 2016.

COOPERATIVE RESEARCH GROUP ON CHINESE SOIL TAXONOMY; LI, F.; GONG, Z.; ZHONGGUO KE XUE YUAN; NANJING TU RANG YAN JIU SUO; GUO JIA ZI RAN KE XUE JI JIN WEI YUAN HUI (CHINA). **Chinese soil taxonomy**. Beijing; New York: Science Press, 2001.

CORDEIRO, F. R.; FONTANA, A.; MENEZES, A. R. DE; ANJOS, L. H. C. DOS; TEIXEIRA, W. G. CRITÉRIOS QUANTITATIVOS PARA A TAXONOMIA DE SOLOS COM HORIZONTE ANTRÓPICO NO SiBCS. **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 2017a.

CORDEIRO, F. R.; FONTANA, A.; MENEZES, A. R. DE; ANJOS, L. H. C. DOS; TEIXEIRA, W. G. CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS COM HORIZONTE ANTRÓPICO NO BRASIL UTILIZANDO OS CRITÉRIOS DO PRETIC HORIZON. **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 2017b.

CORRÊA, G. R. Caracterização pedológica de arqueo-antropossolos no Brasil: sambaquis da Região dos Lagos (RJ) e terras pretas de índio na região do baixo rio Negro/Solimões (AM). 13 ago. 2007.

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; CANELLAS, L. P.; RIBEIRO, L. P.; BENITES, V. DE M.; SANTOS, G. DE A. Soil organic matter and fertility of Anthropogenic Dark Earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian Amazon basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 85–93, 2009a.

CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MADARI, B. E.; BENITES, V. DE M.; MARTIN-NETO, L.; SANTOS, G. DE A. O carbono pirogênico. **Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2009b.

- DE ALMEIDA, G. Sistema Internacional de Unidades (SI). **Grandezas e unidades físicas: Terminologia, símbolos e recomendações**, 1997.
- DE OLIVEIRA, V. Á.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; MENDES, Â. M.; DOS ANJOS, L. H. C.; CIPRIANI, H. N.; DE MEDEIROS, I. M.; CALDERANO, S. B. Solos da XII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos-Rondônia. **Guia de Campo Pesquisas Coligadas XII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos**, p. 61, 2017.
- DEARING, J. Environmental Magnetic Susceptibility: using the Bartington MS2 System, 1999. **Chi Pub. Kenilworth**, p. 0–3, 1999.
- DENEVAN, W. M. Semi-Intensive Pre-European Cultivation and the Origins of Anthropogenic Dark Earths in Amazonia. In: GLASER, B.; WOODS, W. I. (Eds.). **Amazonian Dark Earths: Explorations in Space and Time**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. p. 135–143.
- DOBARCO, M. R.; COUSIN, I.; LE BAS, C.; MARTIN, M. P. Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. **Geoderma**, v. 336, p. 81–95, 2019.
- DONAGEMA, G. K.; DE CAMPOS, D. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W.; VIANA, J. M. Manual de métodos de análise de solo. **Embrapa Solos-Documents (INFOTECA-E)**, 2011.
- ECHART, C. L.; CAVALLI-MOLINA, S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, v. 31, n. 3, p. 531–541, jun. 2001.
- EPSKAMP, S.; CRAMER, A. O.; WALDORP, L. J.; SCHMITTMANN, V. D.; BORSBOOM, D.; OTHERS. qgraph: Network visualizations of relationships in psychometric data. **Journal of Statistical Software**, v. 48, n. 4, p. 1–18, 2012.
- FAO, F. Unesco Soil Map of the World, Revised Legend, with corrections and updates. **World Soil Resources Report**, v. 60, p. 140, 1988.
- FAO-UNESCO, I. Soil map of the world 1:5.000.000. **Legend, Paris**, v. 10 VOLUMES, 1981 1971.
- FAO-UNESCO, I. Soil map of the world. **Vol. I, Legend, Paris**, 1974.
- FARAZDAGHI, H.; HARRIS, P. M. Plant Competition and Crop Yield. **Nature**, v. 217, n. 5125, p. 289–290, jan. 1968.
- FREIRE, L. Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro. **Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 2013.
- GAISER, T.; GRAEF, F.; CORDEIRO, J. C. Water retention characteristics of soils with contrasting clay mineral composition in semi-arid tropical regions. **Soil Research**, v. 38, n. 3, p. 523–536, 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: Biological Sciences**, v. 362, n. 1478, p. 187–196, 28 fev. 2007.
- GLASER, B.; AMELUNG, W. Pyrogenic carbon in native grassland soils along a climosequence in North America. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 17, n. 2, 2003.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biomass e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil – 1:250.000**. Rio de Janeiro. 2019. Disponível em:

<<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/estudos-ambientais/15842-biomas.html?=&t=publicacoes>>. Acessado em: 10 de abril de 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Países da América do Sul da base cartográfica contínua 1:1.000.000. Rio de Janeiro. 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>>. Acessado em: 10 de abril de 2020.

ISBELL, R.; THE NATIONAL COMMITTEE ON SOIL AND TERRAIN. **The Australian soil classification**. [s.l.] CSIRO publishing, 2016.

IUSS WORKING GROUP WRB. **World reference base for soil resources 2014, update 2015: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. [s.l.] Fao Rome, 2015.

JENNY, H. **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. [s.l.] Courier Corporation, 1994.

KAHLE, D.; WICKHAM, H.; KAHLE, M. D. Package ‘ggmap’. 2019.

KÄMPF, N.; CURTI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. **Tópicos em ciência do solo**, v. 1, p. 107–138, 2000.

KÄMPF, N.; KERN, D. C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. **Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 4, p. 277–320, 2005.

KERN, D. C.; DA COSTA, M. L.; FRAZÃO, F. J. L. Evolution of the scientific knowledge regarding Archaeological Black Earths of Amazonia. In: GLASER, B.; WOODS, W. I. (Eds.). **Amazonian Dark Earths: Explorations in Space and Time**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. p. 19–28.

KERN, D. C.; D’AQUINO, G.; RODRIGUES, T. E.; FRAZAO, F. J. L.; SOMBROEK, W.; MYERS, T. P.; NEVES, E. G. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WODOS, W. I. (Eds.). **Amazonian Dark Earths: Origin Properties Management**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003. p. 51–75.

KERN, D. C.; KÄMPF, N. Os efeitos de antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológicas na região de Oriximiná-Pa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, p. 219–225, 1989.

LEHMANN, J.; PEREIRA DA SILVA, J.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, n. 2, p. 343–357, 1 fev. 2003.

LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; GROSSMAN, J.; B, O.; JO, S.; THIES, J.; LUIZÃO, F.; J, P.; NEVES, E. Black carbon increases cation exchange capacity in Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 1719–1730, 1 set. 2006.

LIMA, H. N. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2001.

MACEDO, A. G. DE S. Caracterização e variação temporal da solução do solo em argissolo amarelo com horizonte a moderado e a antrópico (terra preta de índio) no município de Iraduba- AM. 24 abr. 2012.

MACEDO, R. S.; TEIXEIRA, W. G.; LIMA, H. N.; SOUZA, A. C. G. DE; SILVA, F. W. R.; ENCINAS, O. C.; NEVES, E. G.; MACEDO, R. S.; TEIXEIRA, W. G.; LIMA, H. N.; SOUZA,

- A. C. G. DE; SILVA, F. W. R.; ENCINAS, O. C.; NEVES, E. G. Amazonian dark earths in the fertile floodplains of the Amazon River, Brazil: an example of non-intentional formation of anthropic soils in the Central Amazon region. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, v. 14, n. 1, p. 207–227, abr. 2019.
- MADARI, B. E.; MILORI, D.; MARTIN NETO, L.; BENITES, V.; CUNHA, T.; NOVOTNY, E.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. **Embrapa Instrumentação-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2009.
- MARMET, E.; BINA, M., FEDOROFF, N.; TABBAGH, A. Relationships between human activity and the magnetic properties of soils: a case study in the medieval site of Roissyen-France. **Archaeological Prospection**, n. 6, v. 3, p. 161-170, 1999.
- MARTINS, G. C.; TEIXEIRA, W. G.; MACEDO, R. S.; MARQUES, J. D. **Ocorrência de horizontes antrópicos (Terra Preta de Índio) em Neossolos Quartzarênicos no município de Parintins – AM - Brasil. Ocorrência de horizontes antrópicos (Terra Preta de Índio) em Neossolos Quartzarênicos no município de Parintins – AM - Brasil, 2007.**
- MATIAS, S. S. R. [UNESP. Suscetibilidade magnética e sua associação com atributos do solo e do relevo em uma topossequência de Latossolos. **Aleph**, p. xiv, 109 f.: il., 16 abr. 2010.
- MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; CATTLE, S. R.; VERVOORT, R. W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, v. 109, n. 1–2, p. 41–73, 2002.
- MEHLICH, A. Uniformity of expressing soil test results a case for calculating results on a volume basis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 3, n. 5, p. 417–424, 1972.
- MIRANDA, J. F. **TERRAS PRETAS ARQUEOLÓGICAS NO MÉDIO AMAZONAS E ALTO SOLIMÕES: QUÍMICA, MINERALOGIA, MICROMORFOLOGIA E IDADE.** Viçosa, MG.: Universidade Federal de Viçosa, 2018.
- MOREIRA, A.; DE ARRUDA, M.; PEREIRA, J.; GASPAROTTO, L.; PEREIRA, M. Recomendação de adubação e calagem para bananeira no Estado do Amazonas (1ª aproximação). **Embrapa Amazônia Ocidental-Documentos (INFOTECA-E)**, 2005.
- MULLINS, C. E. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science – a Review. **Journal of Soil Science**, v. 28, n. 2, p. 223–246, 1977.
- NASCIMENTO, G. B. DO; ANJOS, L. H. C. DOS; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A.; SANTOS, H. G. Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos - DOI:10.5039/agraria. v5 4 a 551. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v. 5, n. 4, p. 560–569, 30 jun. 2015.
- NEVES, E. G.; PETERSEN, J. B.; BARTONE, R. N.; HECKENBERGER, M. J. The Timing of Terra Preta Formation in the Central Amazon: Archaeological Data from Three Sites. In: GLASER, B.; WOODS, W. I. (Eds.). **Amazonian Dark Earths: Explorations in space and time.** Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. p. 125–134.
- OLIVEIRA, I. A. DE; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E. DE; FREITAS, L. DE; SIQUEIRA, D. S.; CUNHA, J. M. DA; OLIVEIRA, I. A. DE; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E. DE; FREITAS, L. DE; SIQUEIRA, D. S.; CUNHA, J. M. DA. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 668–681, jun. 2015.

- OTTONI, M. V.; OTTONI FILHO, T. B.; LOPES-ASSAD, M. L. R.; ROTUNNO FILHO, O. C. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. **Journal of Hydrology**, 2019.
- PAINE, C. E. T.; MARTHEWS, T. R.; VOGT, D. R.; PURVES, D.; REES, M.; HECTOR, A.; TURNBULL, L. A. How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: an update for ecologists. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 3, n. 2, p. 245–256, 1 abr. 2012.
- PATTON, N. R.; LOHSE, K. A.; SEYFRIED, M.; WILL, R.; BENNER, S. G. Lithology and coarse fraction adjusted bulk density estimates for determining total organic carbon stocks in dryland soils. **Geoderma**, v. 337, p. 844–852, 2019.
- PETER, D. **Introductory statistics with R**. [s.l.] Springer-Verlag New York Inc, 2002.
- PREZOTTI, L. Recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo: 3º aproximação. 2016.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. [s.l.] Open Source Geospatial Foundation, 2009.
- QIAO, J.; ZHU, Y.; JIA, X.; HUANG, L.; SHAO, M. Development of pedotransfer functions for predicting the bulk density in the critical zone on the Loess Plateau, China. **Journal of soils and sediments**, v. 19, n. 1, p. 366–372, 2019.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. 2013.
- RESENDE, M.; SANTANA, D.; REZENDE, S. Susceptibilidade magnética em Latossolos do Sudeste e do Sul do Brasil. **Reunião de Classificação, Correlação de Solos e Interpretação de Aptidão Agrícola**, v. 3, p. 233–258, 1988.
- RITZ, C.; STREIBIG, J. C. **Nonlinear regression with R**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2008.
- ROSSI, N. DAS G.; CANTON, L. C.; CAVALCANTE, R. M.; GOMES, F. H.; SOUZA JUNIOR, I. G. DE; DA COSTA, A. C. S. **Susceptibilidade Magnética e Teores de Ferro Total de Solos do Estado de Rondônia**, 2018. Disponível em: <<http://www.sbc-s-nrs.org.br/rsbcs/docs/trab-2-4211-711.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2020
- SANTOS, H. G. DOS; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. DOS; OLIVEIRA, V. A. DE; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. DE; ARAUJO FILHO, J. C. DE; OLIVEIRA, J. B. DE; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; DOS ANJOS, L. H. C.; DE OLIVEIRA, V. Á.; LUMBREIRAS, J. F.; COELHO, M. R.; DE ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; DE OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3º Edição ed. [s.l.] Embrapa, 2013.
- SCHAEFER, C. E. G. R.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; VALE JR., J. F.; SOUZA, K. W.; CORRÊA, G. R.; MENDONÇA, B. A. F.; AMARAL, E. F.; CAMPOS, M. C. C.; RUIVO, M. L. N. Solos da região amazônica. In: **Solos dos Biomas Brasileiros**. Viçosa, MG.: [s.n.]. p. 117–175. 2017.
- SCHAFER, J.; OPGEN-RHEIN, R.; ZUBER, V.; AHDESMAKI, M.; SILVA, A. P. D.; STRIMMER, K.; STRIMMER, M. K. **Package ‘corpcor’**. [s.l.: s.n.].
- SCHMIDT, M. Amazonian Dark Earths: pathways to sustainable development in tropical rainforests? **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, v. 8, n. 1, p. 11–38, abr. 2013.

- SCHMIDT, M. J.; RAPP PY-DANIEL, A.; DE PAULA MORAES, C.; VALLE, R. B. M.; CAROMANO, C. F.; TEXEIRA, W. G.; BARBOSA, C. A.; FONSECA, J. A.; MAGALHÃES, M. P.; SILVA DO CARMO SANTOS, D.; DA SILVA E SILVA, R.; GUAPINDAIA, V. L.; MORAES, B.; LIMA, H. P.; NEVES, E. G.; HECKENBERGER, M. J. Dark earths and the human built landscape in Amazonia: a widespread pattern of anthrosol formation. **Journal of Archaeological Science**, v. 42, p. 152–165, 1 fev. 2014.
- SCHWERTMANN, U.; CORNELL, R. M. **Iron oxides in the laboratory: Preparation and characterization**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2008.
- SILVA, A. K. T. DA; GUIMARÃES, J. T. F.; LEMOS, V. P.; COSTA, M. L. DA; KERN, D. C. Mineralogy and geochemistry of soil profiles with Archeological Black Earth from Bom Jesus do Tocantins, southeastern Amazon. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 4, p. 477–490, 2012.
- SILVA, F. C. D. S. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. [s.l.] Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos Brasília, 2009. v. 627
- SILVA, R. DE N. P. DA [UNESP. **Interferência de sistemas de manejo na floresta nacional de Caxiuanã, PA nos atributos físicos e químicos na composição isotópica de solo antropizado**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 2013.
- SIMONSON, R. W. **Modern concepts of soil genesis**. Soil Science Society of American Proceedings, Madison. **Anais...**1959
- SIQUEIRA, D. S. [UNESP. Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar. **Aleph**, p. viii, 75 f. : il., grafs., 25 fev. 2010.
- SÖDERSTRÖM, M.; ERIKSSON, J.; ISENDAHL, C.; SCHAAN, D. P.; STENBORG, P.; REBELLATO, L.; PIIKKI, K. Sensor mapping of Amazonian Dark Earths in deforested croplands. **Geoderma**, v. 281, p. 58–68, 1 nov. 2016.
- SOIL SCIENCE DEPARTMENT. **Fertilizer requirements of countries in Latin America: Annual Report**. North Carolina State: North Carolina State University, 1966.
- SOIL SURVEY STAFF. **Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual**. No. 42 ed. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service: Burt and Soil Survey Staff (ed.), 2014a.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy | NRCS Soils**. 12. ed. Washington, DC: USDA-Natural Resources Conservation Service, 2014b.
- SOMBROEK, W. G. **Amazon soils: A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region**. PhD Thesis—[s.l.] Pudoc, 1966.
- SOUZA, K. W. DE. **Gênese, mineralogia, micromorfologia e formas de fósforo em arqueo-antropossolos da várzea do Rio Amazonas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 31 mar. 2011a.
- SOUZA, K. W. DE. Gênese, mineralogia, micromorfologia e formas de fósforo em arqueo-antropossolos da várzea do Rio Amazonas. 31 mar. 2011b.
- SOUZA JUNIOR, I. G. DE; CESAR, A. C. S. C.; VILARII, C.; HOEPERSI, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural**, v. 40, n. 3, p. 513–519, 2010.
- SPEARMAN, C. The Proof and Measurement of Association between Two Things. **The American Journal of Psychology**, v. 15, n. 1, p. 72–101, 1904.

- STERNBERG, R.; SPARKS, A.; KNUDTSON, O. Magnetic Surveys Over Burning and Remediated Coal Seam Fires in Western North Dakota. In: **Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2008**. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems Proceedings. [s.l.] Environment and Engineering Geophysical Society, 2008. p. 389–398.
- STEWART, V.; ADAMS, W.; ABDULLA, H. Quantitative pedological studies on soils derived from Silurian mudstones: II. The relationship between stone content and the apparent density of the fine earth. **Journal of Soil Science**, v. 21, n. 2, p. 248–255, 1970.
- STUDENT. The probable error of a mean. **Biometrika**, p. 1–25, 1908.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. **3ª edição revista e atualizada. Brasília, DF: EMBRAPA. 573p, 2017a.**
- TEIXEIRA, W. G. **O manejo do solo pelas populações pré-colombianas na Amazônia brasileira: vestígios deixados nas terras pretas de índio e terras mulatas.** Embrapa Amazônia Ocidental-Artigo em anais de congresso (ALICE). **Anais...In: REUNIÃO AMAZÔNICA DE AGROECOLOGIA, 1., 2007, Manaus. A agroecologia no ..., 2007**
- 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.** [s.l.] Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009., 2009.
- TEIXEIRA, W. G.; SCHMIDT, M.; SHINZATO, E.; MANSUR, K.; SCHAAN, D.; FONTANA, A.; CERNICCHIARO, G. **Susceptibilidade magnética em amostras de solos de sítios arqueológicos do Brasil: potencialidades e limitações da avaliação do fenômeno da termoremanência.** Embrapa Solos-Resumo em anais de congresso (ALICE). **Anais...In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 16., 2017 ..., 2017b**
- TEIXEIRA, W.; SHINZATO, E.; LUMBRERAS, J.; NOGUEIRA, J. A susceptibilidade magnética e a condutividade elétrica aparente de amostras dos solos da XI Reunião de Classificação e Correlação de Solos (RCC de Roraima). In: [s.l: s.n.]. p. 365–380. 2018.
- TOMÉ JÚNIOR, J. B. Manual para interpretação de análise de solo. **Guaíba: agropecuária, v. 1997, 1997.**
- TUKEY, J. W. Box-and-whisker plots. **Exploratory data analysis**, p. 39–43, 1977.
- VAN DEN BERG, M.; KLAMT, E.; VAN REEUWIJK, L. P.; SOMBROEK, W. G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, v. 78, n. 3, p. 161–180, 1 ago. 1997.
- VEROSUB, K. L.; ROBERTS, A. P. Environmental magnetism: Past, present, and future. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 100, n. B2, p. 2175–2192, 1995.
- WICKHAM, H.; WICKHAM, M. H. Package tidyverse. **Easily Install and Load the ‘Tidyverse**, 2017.
- WOODS, W. I.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; STEINER, C.; WINKLERPRINS, A.; REBELLATO, L. (EDS.). **Amazonian dark earths: Wim Sombroek’s vision.** Dordrecht: Springer Science + Business Media, 2009.

## ANEXOS

### Anexo I – Coordenadas dos perfis de TPI da base de dados referente ao Capítulo 2.

CC: Perfil com Coordenadas de Campo e CSM: Perfil com Coordenadas de Sede municipal.

Perfis	Autor	Município e Estado	Latitude	Longitude	Observação
1	RCC 2015	Rorainópolis - Roraima	0.9759	-60.4493	CC
2	Lima, 2001	Irاندوبا - AM	-3.2847	-60.1861	CSM
3	Lima, 2001	Irاندوبا - AM	-3.2847	-60.1861	CSM
3	Lima, 2001	Irاندوبا - AM	-3.2847	-60.1861	CSM
4	Lima, 2001	Irاندوبا - AM	-7.2102	-59.9212	CSM
5	Santos et al., 2013	Apuí - AM	-7.2190	-59.8859	CC
6	Santos et al., 2013	Apuí - AM	-7.2271	-59.8684	CC
7	Santos et al., 2013	Apuí - AM	-7.1989	-59.9114	CC
8	Santos et al., 2013	Apuí - AM	-7.1939	-59.9124	CC
9	Santos et al., 2013	Apuí - AM	-7.2804	-59.9490	CC
10	Santos et al., 2013	Apuí - AM	-7.9425	-61.5131	CC
11	Santos et al., 2013	Manicoré - AM	-8.0048	-61.6642	CC
12	Campos et al., 2012	Manicoré - AM	-8.0048	-61.6642	CC
13	Campos et al., 2012	Manicoré - AM	-8.0048	-61.6642	CC
14	Campos et al., 2012	Manicoré - AM	-8.0048	-61.6642	CC
15	Campos et al., 2012	Manicoré - AM	-3.2850	-60.1858	CSM
16	Corrêa, 2007.	Manaus - AM	-3.2850	-60.1858	CSM
17	Corrêa, 2007.	Manaus - AM	-3.2850	-60.1858	CSM
18	Corrêa, 2007.	Manaus - AM	-3.2850	-60.1858	CSM
19	Corrêa, 2007.	Manaus - AM	-3.2850	-60.1858	CSM
20	Corrêa, 2007.	Manaus - AM	-3.2850	-60.1858	CSM
21	Corrêa, 2007.	Manaus - AM	-3.2850	-60.1858	CSM
22	Corrêa, 2007.	Manaus - AM	-3.2850	-60.1858	CSM
23	Corrêa, 2007.	Manaus - AM	-5.1117	-48.6742	CC
24	Silva et al., 2012	Bom Jesus do Tocantins - PA	-1.7923	-51.4340	CSM
25	Kämpf & Kern, 2005	Caxiuanã - PA	-1.0006	-50.2078	CSM
26	Kämpf & Kern, 2005	Marajó - PA	-7.1972	-59.8914	CSM
27	Kämpf & Kern, 2005	Apuí - AM	-1.7656	-55.8661	CC
28	Kämpf & Kern, 1989	Oriximiná - PA	-1.7656	-55.8661	CC
29	Kämpf & Kern, 1989	Oriximiná - PA	-2.4431	-54.7083	CSM
30	Ranzani et al., 1962	Santarém - PA	-2.4431	-54.7083	CSM
31	Ranzani et al., 1962	Santarém - PA	-3.2394	-60.2172	CC
32	Macedo, 2012	Irاندوبا - AM	-3.2003	-59.8119	CSM
33	Souza, 2011	Careiro da Várzea - AM	-3.2003	-59.8119	CSM
34	Souza, 2011	Careiro da Várzea - AM	-3.2003	-59.8119	CSM
35	Souza, 2011	Careiro da Várzea - AM	-3.2847	-60.1861	CSM
36	Souza, 2011	Irاندوبا - AM	-3.2847	-60.1861	CSM
37	Souza, 2011	Irاندوبا - AM	-3.2997	-60.6206	CSM
38	Souza, 2011	Manacapuru - AM	-3.2997	-60.6206	CSM

39	Souza, 2011	Manacapuru - AM	-3.2997	-60.6206	CSM
40	Souza, 2011	Manacapuru - AM	-3.2997	-60.6206	CSM
41	Souza, 2011	Manacapuru - AM	-3.773	-61.6444	CSM
42	Souza, 2011	Anorí - AM	-3.8367	-62.0569	CSM
43	Souza, 2011	Codajás - AM	-3.8367	-62.0569	CSM
44	Souza, 2011	Codajás - AM	-3.8367	-62.0569	CSM
45	Souza, 2011	Codajás - AM	-4.0850	-63.1414	CSM
46	Souza, 2011	Coarí - AM	-4.0850	-63.1414	CSM
47	Souza, 2011	Coarí - AM	-4.0850	-63.1414	CSM
48	Souza, 2011	Coarí - AM	-4.0850	-63.1414	CSM
49	Souza, 2011	Coarí - AM	-3.2394	-60.2172	CC
50	Macedo, 2014	Irاندوبا - AM	-1.6788	-51.3353	CC
51	Silva, 2013	Caxiuanã - PA	-2.4759	-56.4425	CC
52	Martins et al.	Parintins - AM	-2.4791	-56.4432	CC
53	Martins et al.	Parintins - AM	-2.4777	-56.4438	CC
54	Martins et al.	Parintins - AM	-3.2020	-60.3358	CC
55	Macedo et al., 2007	Irاندوبا - AM	-3.2020	-60.3358	CC
56	Macedo et al., 2007	Irاندوبا - AM	-3.2997	-60.6206	CSM
57	Teixeira et al., 2006	Manacapuru - AM	-13.5003	-60.5617	CC
58	Ademir Fontana RCC 2017	Rondônia	-3.3511	-60.6681	CC
59	Macedo et al., 2019	Costa do Marrecão, Manacapuru	-3.3589	-60.6778	CC
60	Macedo et al., 2019	Costa do Marrecão, Manacapuru	-3.8961	-61.8631	CC
61	Macedo et al., 2019	Comunidade São Lázaro, Anori	-3.8661	-62.5858	CC
62	Macedo et al., 2019	Comunidade Lauro Sodré, Coari	-3.9781	-61.7033	CC
63	Macedo et al., 2019	Comunidade São Lázaro, Anori	-3.7886	-62.2253	CC
64	Macedo et al., 2019	Comunidade Matrinxã, Codjás	-3.7125	-60.9422	CC
65	Macedo et al., 2019	Costa do Pararati, Manacapuru	-3.7017	-61.0586	CC
66	Macedo et al., 2019	Comunidade Repartimento, Manacapuru	-7.2000	-59.6597	CC
67	Santos et al., 2018	Apuí – AM	-7.2008	-59.6597	CC
68	Santos et al., 2018	Apuí – AM	-7.2022	-59.6597	CC
69	Santos et al., 2018	Apuí – AM	-7.2025	-59.6600	CC
70	Santos et al., 2018	Apuí – AM	-7.1091	-59.8519	CC
71	Aquino et al., 2015	Apuí – AM	-7.1153	-59.8728	CC
72	Aquino et al., 2015	Apuí – AM	-7.1192	-59.7670	CC
73	Aquino et al., 2015	Apuí – AM	-7.1516	-59.7145	CC
74	Aquino et al., 2015	Apuí – AM	-7.1679	-59.7154	CC
75	Aquino et al., 2015	Apuí – AM	-7.2079	-59.6729	CC
76	Aquino et al., 2015	Apuí – AM	-13.4978	-60.5542	CC
77	Cavassani, 2018	Caxibi	-13.4978	-60.5542	CC
78	Cavassani, 2018	Caxibi	-13.4978	-60.5542	CC
80	Cavassani, 2018	Pimenteiras do Oeste	-13.4825	-61.0467	CC
81	Cavassani, 2018	Cerejeiras	-13.1889	-60.8122	CC
82	Cavassani, 2018	Cerejeiras	-13.1889	-60.8122	CC
83	Miranda, 2018	Distrito Sampaio, município de Autazes-AM	-3.5800	-59.1308	CSM
84	Miranda, 2018	Comunidade Josefa, município de Autazes-AM	-3.5800	-59.1308	CSM

85	Miranda, 2018	Distrito Sampaio, município de Autazes-AM	-3.5800	-59.1308	CSM
86	Miranda, 2018	Rio Autaz-Açú, município de Autazes-AM	-3.5800	-59.1308	CSM
87	Miranda, 2018	Rio Autaz-Açú, município de Autazes-AM	-3.5800	-59.1308	CSM
88	Miranda, 2018	Lago Acará Grande, município de Autazes-AM	-3.5800	-59.1308	CSM
89	Miranda, 2018	Borda Josefa, município de Autazes – AM	-3.5800	-59.1308	CSM
90	Miranda, 2018	Lago Acará Grande, município de Autazes-AM	-3.5800	-59.1308	CSM
91	Miranda, 2018	Rio Preto Pantaleão, município de Autazes-AM	-3.5800	-59.1308	CSM
92	Miranda, 2018	Rio Preto Pantaleão, município de Autazes-AM	-3.5800	-59.1308	CSM
93	Miranda, 2018	São Paulo de Olivença – AM	-3.4594	-68.9333	CSM
94	Miranda, 2018	Amaturá – AM	-3.3639	-68.1978	CSM
95	Miranda, 2018	Amaturá – AM	-3.3639	-68.1978	CSM
96	Miranda, 2018	Amaturá – AM	-3.3639	-68.1978	CSM
97	Miranda, 2018	Amaturá – AM	-3.3639	-68.1978	CSM
98	Miranda, 2018	Amaturá – AM	-3.3639	-68.1978	CSM
99	Miranda, 2018	São Paulo de Olivença – AM	-3.4594	-68.9333	CSM
100	Silva et al., 2011	Comunidade São João Batista - AM	-3.3039	-60.5600	CC
101	Silva et al., 2011	Sítio Lauro Soudré – AM	-3.8550	-62.6006	CC
102	Silva et al., 2011	Sítio Pilão – AM	-3.2003	-60.3350	CC
103	Silva et al., 2011	Sítio Lago do Limão – AM	-3.1856	-60.3461	CC
104	Silva et al., 2011	Sítio Ena – AM	-3.8211	-62.1375	CC