

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS-UEA  
CENTRO DE ESTUDOS SUPERIORES DE TEFÉ-CEST**

**ESTUDO DA FERTILIDADE E FRACIONAMENTO INORGÂNICO  
DE FÓSFORO EM TERRA PRETA**

*Emilly Cristina da Silva Barbosa<sup>1</sup>  
Erasmio Sérgio Ferreira Pessoa Junior<sup>2</sup>*

**Resumo**

Diante do cenário infértil dos solos amazônicos é possível observar a presença de manchas de solo escuro, altamente férteis denominados de Terra Preta de Índio (TPI), que apresentam elevada quantidade de matéria orgânica e altas concentrações de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e fósforo (P). Este trabalho teve por objetivo caracterizar os parâmetros químicos e textura dos solos de TPI em profundidade e entender as formas do fracionamento de P inorgânico (Pi) no perfil da TPI do Distrito de Caiambé. Para caracterização da TPI foram feitas análises dos parâmetros de fertilidade do solo, granulometria e classificação textural. O fracionamento do Pi foi feito segundo Chang e Jackson (1957), com algumas modificações sugeridas por Novais e Kamprath (1978). As quantidades de P dos extratos do fracionamento foram quantificadas por espectroscopia UV-Vis pelo método do ácido ascórbico no comprimento de onda de 885 nm. A análise granulométrica indicou predomínio da fração areia e baixo teor de argila em superfície. Os atributos químicos mostraram alta variabilidade com a profundidade e os resultados do fracionamento demonstraram que os altos teores de P observados são provenientes, sobretudo, do material de origem, destacando que a forma de P ligado ao Ca foi predominante em relação às outras formas do fracionamento. Nesse sentido, os resultados obtidos contribuíram para o entendimento da matriz da TPI do Caiambé em várias profundidades, assim como também na dinâmica das frações inorgânicas do P em profundidade.

**Palavras-Chave:** Distrito de Caiambé; Solo antrópico; Frações de Fósforo Inorgânico.

---

Acadêmico do curso de licenciatura em química pela Universidade do Estado do Amazonas UEA/CEST.  
E-mail: emillycbarbosa97@gmail.com

Professor Dr. do colegiado de Química da Universidade do Estado do Amazonas, Orientador do trabalho  
– Estrada do Bexiga nº 1085, Jerusalém Tefé-AM: esjunior@uea.edu.br

## 1. Introdução

A maioria dos solos amazônicos é caracterizada por apresentar elevada acidez, baixa concentração de nutrientes e por isso sendo impróprio para alguns cultivos. Entretanto, existente em toda extensão da Bacia Amazônica, as Terras Pretas de Índio (TPI), ou simplesmente Terras Pretas (TP), são solos antrópicos altamente férteis se comparados aos solos adjacentes, uma vez que apresentam elevado teor de matéria orgânica (MO) e ampla disponibilidade de nutrientes como o cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), zinco ( $\text{Zn}^{2+}$ ) e principalmente fósforo (P). Além de que são caracterizados por sua coloração escura e por apresentarem fragmentos cerâmicos arqueológicos (FALCÃO e BORGES, 2006; MADARI *et al.*, 2009; MOREIRA *et al.*, 2009).

Tem sua origem atribuída à cultura de subsistência dos antigos povos pré-colombianos que habitaram o território amazônico, visto que a sua formação está associada ao descarte de restos de materiais de origem orgânica, ricos em P, como espinhas de peixes, animais silvestres, restos de alimentos e ossos humanos (GLASER *et al.*, 2001). Dessa maneira, contribuindo para a elevada concentração desse nutriente, chegando a apresentar teor 10 vezes mais do que os solos adjacentes, os solos típicos da Amazônia, como os Latossolos e argissolos (GERMAN, 2004).

Do ponto de vista granulométrico, estudos indicam que os solos antropogênicos na camada superficial apresentam elevada concentração de areia e baixo teor de argila, mas conforme o aumento da profundidade ocorre redução da fração areia e aumento da fração argila (BARROS *et al.*, 2012). Tal característica comum em solos de TPI pode ser resultado da combinação da prática do fogo com a deposição de MO pelos povos antigos, formando material organomineral estável, cujo tamanho assemelha-se à areia (TEXEIRA *et al.*, 2009). Entretanto tal característica não se aplica a todos os solos de TPI, sendo possível ocorrer exceções em diferentes localidades.

De maneira geral, são solos que apresentam pH em água variando de 4,32 a 6,61 e em solução de KCl 1,0 M de 3,77 a 6,01 (FALCÃO *et al.*, 2003). Além disso, possuem elevada fertilidade decorrente do alto teor de MO, no entanto essas quantidades podem variar em função do local de coleta e profundidade, evidenciando o caráter heterogêneo das TPI, visto que foram expostas a diferentes condições ambientais e atividades humanas (CAMPOS *et al.*, 2011).

O aporte de materiais de origem orgânica durante o processo de formação da TPI contribuiu para o aumento do teor de nutrientes como o  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , P,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$ . Geralmente a concentração desses nutrientes apresenta variabilidade conforme a

profundidade, em destaque as maiores concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em superfície, contudo observa-se que com o aumento da profundidade há ocorrência de maiores concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e P, provenientes, provavelmente, dos descartes de resíduos como espinhas de peixe, ossos de mamíferos, carapaças de quelônios e possivelmente ossos humanos, dessa forma influenciando no teor de fósforo ligado ao cálcio (PESSOA JUNIOR *et al.*, 2012; TEIXEIRA e LIMA, 2016)

O elevado teor de P e ampla disponibilidade para o solo é uma das características marcantes da TPI. Em termos quantitativos, a concentração de P total pode variar de 192,0 a 13.870,0  $\text{mg kg}^{-1}$ , dentro de uma mesma extensão de TPI e em profundidade do perfil do solo (LEHMANN, 2004). No entanto o P disponível apresenta variação de 3,0 a 2.275,0  $\text{mg kg}^{-1}$  (SOARES, 2007; MOREIRA, 2007). O quantitativo do P total e disponível advém de diferentes formas presentes no solo, entendidas como orgânicas e inorgânicas (GATIBONI *et al.*, 2005).

A presença de P em TPI também é decorrente da intemperização da hidroxiapatita biogênica, mineral rico em P e  $\text{Ca}^{2+}$ . A partir da sua dissolução, ocorre à liberação de P e vários compostos desse elemento são formados no solo, como os ortofosfatos  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e o  $\text{HPO}_4^{2-}$  que representam a forma inorgânica simples de P disponível que pode ser absorvido pelas plantas. Os ortofosfatos dissolvidos na solução do solo podem reagir com os elementos  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ , formando compostos pouco solúveis (MANAHAM, 2013; LOPES, 1998).

Nem todo o potencial de P do solo está disponível para ser eluviado e/ou absorvido pela planta. No entanto, apenas parte desse nutriente está disponível, sendo imprescindível avaliar a disponibilidade de P na solução do solo. Nesse sentido, na quantificação do P disponível é possível a utilização de métodos, que utilizam diversos extratores, como Bray-1, Olsen, Mehlich-1, Mehlich-2, Mehlich-3 e resina trocadora de íons, com exceção da resina trocadora de íons, os demais extratores são caracterizados pela preparação rápida, baixo custo e normalmente serem bem correlacionados com o P absorvido pelas plantas (ROCHA *et al.*, 2005).

Usualmente o extrator mais utilizado em estudos de solos antropogênicos é o Mehlich-1 (PESSOA JUNIOR e SANTANA, 2017), formado a partir da mistura de HCl e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  com pH em torno de 1,2 (MEHLICH, 1953). Tem como princípio a dissolução ácida, dissolvendo predominantemente compostos fosfatados de  $\text{Ca}^{2+}$  e quantidades menores de P ligado a  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  (SOUZA, 2011). Entretanto, apesar de ser o extrator mais utilizado em laboratórios de análises de solo, as extrações utilizando Mehlich-1

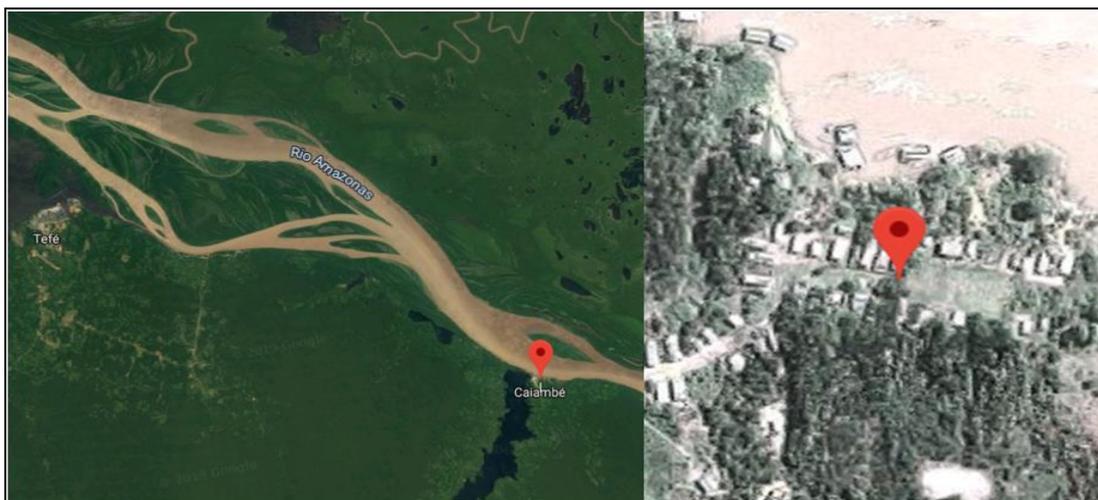
superestimam as quantidades de P disponíveis em TPI (SANTOS *et al.*, 2008; PESSOA JUNIOR, 2011).

Outro mecanismo que pode fornecer dados importantes para a avaliação da disponibilidade do P no solo é a utilização de técnicas que separam as diferentes formas de P, possibilitando à compreensão da dinâmica desse elemento em TPI. Essas formas podem ser caracterizadas por meio da utilização sequencial de soluções extratoras de composição e capacidade de extração diversificada, sendo os métodos mais acessíveis os fracionamentos químicos (SILVA e RAIJ, 1999; RHEINHEIMER *et al.*, 2000; ROTTA, 2012; BOITT, 2014). Dessa forma, uma alternativa para caracterizar e quantificar as formas de fósforo inorgânicos (Pi) presentes na TPI de Caiambé é o fracionamento químico desenvolvido por Chang e Jackson (1957). Este método consiste na extração sequencial utilizando soluções seletivas para extrair as formas de P fracamente ligado ( $P_{(FL)}$ ), ligado ao alumínio ( $P_{(Al)}$ ), ferro ( $P_{(Fe)}$ ) e cálcio ( $P_{(Ca)}$ ) (FALCÃO *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2003).

Nesse sentido, este estudo é uma contribuição da caracterização química e textural do perfil da TPI do Distrito de Caiambé, bem como do entendimento da variação das formas de P em profundidade, contribuindo para a compreensão acerca da fertilidade do solo e de sua manutenção.

## 2. METODOLOGIA

Para o estudo da fertilidade e fracionamento do Pi foram coletadas amostras de TPI do distrito de Caiambé (03°31'54.0" S, 64°24'29.3" W) do município de Tefé (Figura 1), com auxílio de tubo metálico de 100 mm, posteriormente a amostra foi separada a cada 10 cm, tomado como referência uma fita métrica, até a medida de 50 cm de profundidade, onde ocorre à transição do horizonte antrópico com o solo adjacente (Figura 2).



**Figura 1** – Mapa de localização da área de estudo.

**Fonte:** Google Earth, adaptado por Barbosa, 2019



**Figura 2** – TPI coletada no Distrito de Caiambé

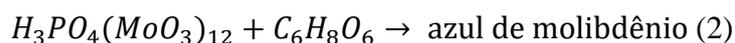
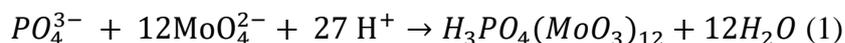
**Fonte:** FELÍCIO, 2017

As amostras foram secas ao ar no laboratório de química do Centro de Estudos Superiores de Tefé – UEA e peneiradas em malha de 2,0 mm de diâmetro, em seguida submetidas a análises de caracterização textural e de fertilidade de acordo com o procedimento metodológico descrito pela EMBRAPA (1999) e constaram das seguintes determinações.

Análise granulométrica realizada pelo método da pipeta, em que foi empregado como dispersante químico uma solução de 100 mL de NaOH 1,0 mol L<sup>-1</sup> e posto em agitação mecânica por 10 min. Para a determinação do teor de argila uma quantidade da suspensão do solo foi submetida a evaporação da água, em seguida seca em estufa e por fim pesada. A fração grosseira (areia) foi separada por tamisação, seca em estufa e pesada para obtenção do percentual. O silte foi calculado pela diferença das outras frações em relação à amostra original, uma vez que este corresponde ao complemento dos percentuais para 100%.

Para a determinação de nitrogênio (N) total utilizou-se o método de Kjeldahl. O pH em água e em solução de KCl 1 mol L<sup>-1</sup> foi obtido pelo método potenciométrico utilizando-se 10 g de solo para 25 mL de água ou solução de KCl, tendo como relação 1:2,5. O carbono orgânico foi determinado pelo método Walkley-Black que consiste na titulometria com sulfato ferroso amoniacal após oxirredução por via úmida com dicromato de potássio. A quantidade de matéria orgânica foi calculada multiplicando-se o resultado do carbono orgânico pelo fator 1,724, tendo em vista que na composição média do húmus o carbono contribui com 58%.

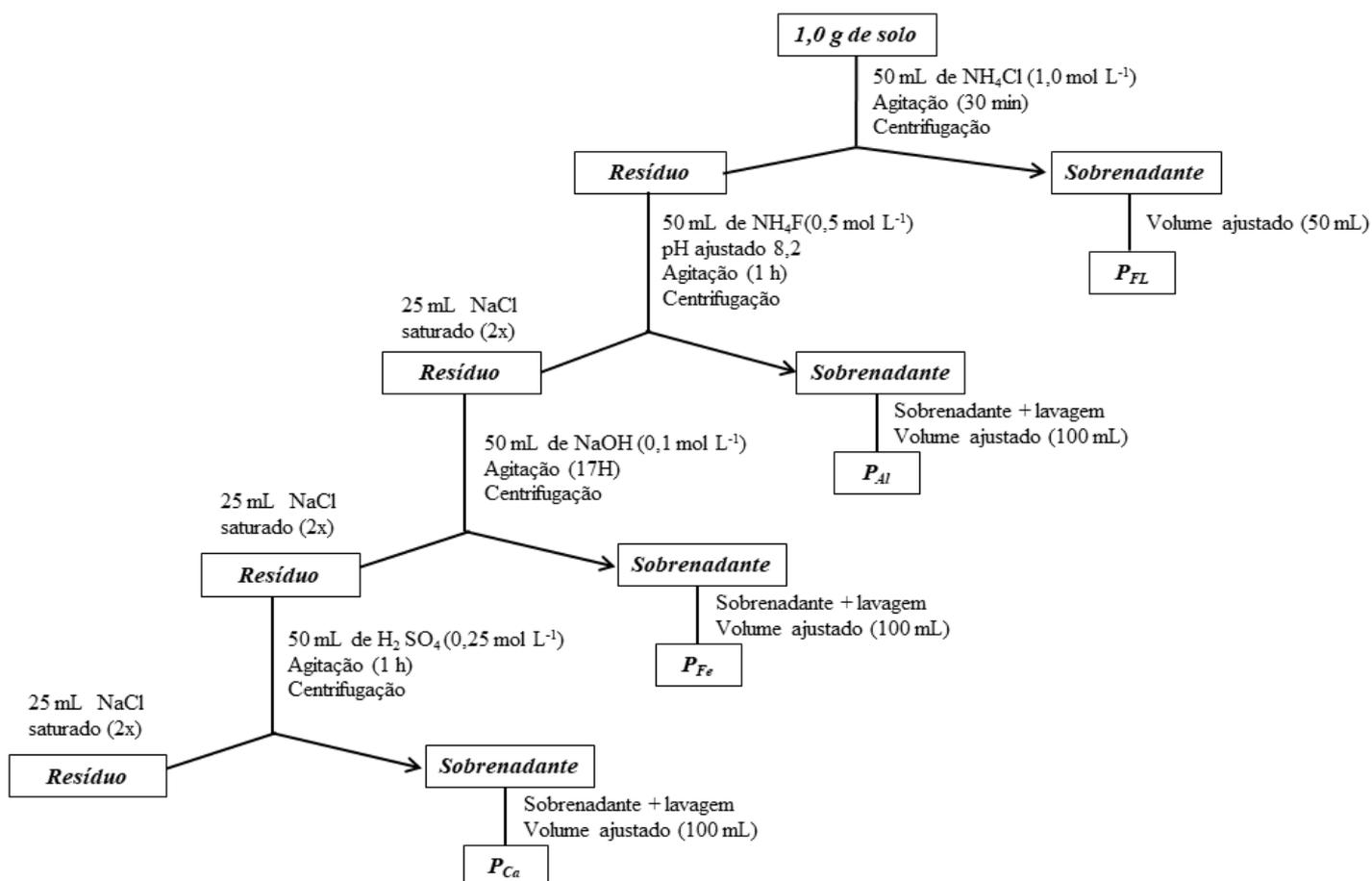
O K<sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> e P foram extraídos pelo Mehlich-1 na proporção de 10 g de solo para 100 mL de extrator. O K<sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> e Cu<sup>2+</sup> disponíveis foram quantificados por Espectroscopia de Absorção Atômica de Chama. Já o P disponível foi determinado espectrofotometricamente pelo método do ácido ascórbico, no qual ocorre a leitura da intensidade da cor do complexo fosfomolibídico produzido pela redução do molibdato de amônio com o ácido ascórbico. Uma vez que os íons ortofosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) em contato com o molibdato (MoO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) no meio ácido, formam o heteropoliácido 12-molibdofosfórico (equação 1), o qual é reduzido à azul de molibdênio (equação 2), a intensidade da cor é proporcional ao teor de íons fosfato presentes na amostra (MASINI, 2008).



O Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> trocáveis foram extraídos com solução de KCl 1 mol L<sup>-1</sup>, utilizando 7,5 g de solo e 150 mL de extrator submetidos a agitação moderada e mantida em repouso por uma noite, posteriormente quantificados por Espectroscopia de Absorção Atômica de Chama.

Para a determinação do Pi utilizou-se como metodologia o fracionamento proposto por Chang e Jackson (Figura 3) com algumas modificações sugeridas por Novais e Kamprath (1978), ou seja, com a extração sequencial dos extratores  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (1,0 mol/L),  $\text{NH}_4\text{F}$  (0,5 mol/L, com pH de 8,2 ajustado com  $\text{NH}_4\text{OH}$  4,0 mol/L),  $\text{NaOH}$  (0,1 mol/L) e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (0,25 mol/L), na razão 1:50 (massa de solo/volume de extrator), para obter as formas de  $P_{(FL)}$ ,  $P_{(Al)}$ ,  $P_{(Fe)}$  e  $P_{(Ca)}$ , respectivamente.

Os tempos de extrações utilizados foram de 30 min para  $P_{(FL)}$ ; 1h para  $P_{(Al)}$ ; 17h para  $P_{(Fe)}$ ; e 1h para  $P_{(Ca)}$  a 240 rpm de rotação, em uma mesa horizontal circular (marca Orbital 141). A partir da etapa do fracionamento de  $P_{(Al)}$ , os resíduos de solo foram lavados duas vezes com solução de  $\text{NaCl}$  saturado, a cada troca de extrator. Todos os sobrenadantes foram separados do resíduo de solo, por centrifugação a 3000 rpm, no tempo de 10 min. Os sobrenadantes obtidos com a solução de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  foram avolumados em balão volumétrico de 50 mL, os outros extratos em balão volumétrico de 100 mL.



**Figura 3** - Esquema do fracionamento de fósforo inorgânico proposto por Chang e Jackson com algumas modificações sugeridas por Novais e Kamprath

Fonte: Autoral.

Para obtenção de extratos lípidos, os extratos que apresentaram coloração escura foram submetidos à filtração com filtro oval em um sistema acoplado em uma bomba a vácuo (compressor cirúrgico marca AC-45 Olidefcz). Após a filtração, o pH de todos os extratos foi ajustado para aproximadamente 3 com NaOH 1,0 mol L<sup>-1</sup> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,25 mol L<sup>-1</sup>, com auxílio de papel indicador de pH 0-14 (marca MERCK).

Para a quantificação do P na sua forma de fosfato, foi realizada a determinação pelo método do ácido ascórbico (PIERZYNSKI, 2000). A solução foi preparada no momento das análises e consistiu na mistura de 50 mL da solução estoque com 1,5 g de ácido ascórbico e avolumada em balão volumétrico de 1 L com água destilada. Na preparação de 1L da solução estoque utilizou-se 20 g de molibdato de amônio, 0,70g de tartarato de antimônio e potássio e 320 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado.

Uma vez preparada a solução de trabalho, retirou-se uma alíquota de 5,0 mL dos extratos de NH<sub>4</sub>Cl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e adicionou-a a 10 mL da solução de trabalho. Assim como no extrato anterior retirou-se 5,0 mL das amostras de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,25 mol L<sup>-1</sup>, e as transferiu para um balão volumétrico de 50 mL juntamente com 10 mL da solução de trabalho. Nos extratos de NH<sub>4</sub>F 0,5 mol L<sup>-1</sup> além de 10 mL da solução de trabalho e 5 mL das amostras foi adicionado 15,0 mL de ácido bórico 0,8 mol L<sup>-1</sup>.

Para a curva de calibração, utilizaram-se padrões de P na faixa de 0,1; 0,3; 0,6; 0,9; e 1,2 ppm de P na forma de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, onde as mesmas proporções usadas para determinação das amostras de P foram mantidas no preparo dos padrões. O tempo de reação do sobrenadante com a solução reagente foi de 30 min, em seguida as leituras das amostras foram realizadas em um espectrofotômetro (Nova, modelo NI 2000) no comprimento de onda de 885nm. Todas as determinações foram realizadas em duplicata para avaliações estatísticas.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1. Análise granulométrica e classificação textural**

A Tabela 1 mostra os resultados da granulometria e classificação textural segundo o triângulo textural da Embrapa, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA) e Departamento de Agricultura do Reino Unido (ADAS).

Tabela 1 - Análise granulométrica da TPI do Caiambé e classificação textural

Prof. (cm)	Areia	Silte	Argila	Classificação		
				Embrapa	USDA	ADAS
0-10	415,26	348,24	236,50	Franca	Franca	Franco-Argilosa
10-20	428,09	307,41	264,50	Franca	Franca	Franco-Argilosa
20-30	494,27	303,23	202,50	Franca	Franca	Franco-Argilosa
30-40	556,98	272,52	170,50	Franca	Franco-arenosa	Franco-arenosa
40-50	531,44	293,06	175,50	Franca	Franco-arenosa	Franco-arenosa

Os resultados mostram que ocorreu redução da quantidade de argila e aumento das quantidades de areia com o aumento da profundidade (de 0 a 50 cm), em um ponto da TPI do Distrito de Caiambé. Em consequência disso foi possível obter três tipos de classificação textural: a primeira pela Embrapa, franca; a segunda pela USDA, franca e franca-arenosa; e a terceira pela ADAS, franco-argilosa e franco-arenosa. Os resultados apresentados neste trabalho corroboram com Soares *et al.* (2015). Vale ressaltar que é bem comum em solos de TPI a maior quantidade da fração areia em camadas superiores (SOUZA *et al.*, 2009), característica que não foi observada neste estudo.

### 3.2. Caracterização química da fertilidade

Nas análises químicas realizadas observou-se que o pH em água apresenta acidez fraca, uma vez que os valores variaram de 6,29 a 6,55. Os valores de pH em KCl foram inferiores em todas as amostras, variando de 4,77 a 4,91. A relação entre o pH em KCl e água, através do  $\Delta$ pH mostra o predomínio de carga superficial líquida negativa do solo, tanto em superfície, quanto em profundidade (MACEDO, 2009; SILVA *et al.*, 2011). Os valores de pH concordam com as elevadas quantidades de  $\text{Ca}^{2+}$  e MO (Tabela 2), corroborando também com os resultados de Campos *et al.* (2012) em TPI de Manicoré.

Tabela 2 – Caracterização química da TPI de Caiambé

Profundidade (cm)	pH	pH	C	MO	N	P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>
	H <sub>2</sub> O	KCl											
0-10	6,29	4,77	22,78	39,28	1,46	155,94	4,74	0,66	0,07	108,50	36,90	63,00	6,80
10-20	6,55	4,91	18,31	31,57	0,94	473,67	5,14	0,62	0,04	139,50	19,90	32,00	6,40
20-30	6,49	4,86	19,80	34,14	0,73	1103,86	5,56	0,49	0,05	192,50	22,90	30,00	6,70
30-40	6,49	4,89	20,10	34,66	0,54	1401,85	4,97	0,45	0,05	235,50	25,90	28,00	7,20
40-50	6,52	4,90	12,66	21,82	0,41	893,79	4,37	0,45	0,06	307,50	20,90	26,00	5,60
Máximo	6,55	4,91	22,78	39,28	1,46	1401,85	5,56	0,66	0,07	307,50	36,90	63,00	7,20
Mínimo	6,29	4,77	12,66	21,82	0,41	155,93	4,37	0,45	0,04	108,50	19,90	26,00	5,60
Média	6,47	4,87	18,73	32,29	0,82	805,82	4,96	0,53	0,05	196,70	25,30	35,80	6,54
Desvio Padrão	0,10	0,06	3,76	6,48	0,41	496,11	0,45	0,10	0,01	78,82	6,88	15,37	0,60

As quantidades de MO diminuem com o aumento da profundidade com máximo de 39,28 g/kg e mínimo de 21,82 g/kg. O valor de desvio padrão para o conjunto de resultados mostra baixa variabilidade das quantidades de MO até a profundidade de 50 cm. Via de regras os solos de TPI apresentam elevadas quantidades de MO, entretanto, essas quantidades podem variar em função do local de coleta e profundidade. Como por exemplo, os valores de MO obtidos por Silva (2008) nas amostras de TPI de Codajás que apresentaram comportamento diferenciado, constatando o aumento da concentração conforme a profundidade, variando de 30,06 a 50,0 g/kg. Em contrapartida, o teor de MO obtida nas análises de TPI realizadas na região do médio Rio Madeira por Campos *et al.* (2011) apresentaram comportamento semelhante com este estudo, verificando tendência de decréscimo na concentração com o aumento da profundidade.

Quanto aos teores de nitrogênio (N), os resultados mostram que ocorreu redução da concentração conforme o aumento da profundidade (Tabela 2). Moline *et al.* (2016), encontrou maior quantidade de N em TPI, na ordem de 2,5 g/kg, em contrapartida trabalhos desenvolvidos por Soares (2007) e Moreira (2007) apresentaram resultados semelhantes com este estudo, os resultados obtidos na camada superficial foram 1,63 g/kg e 1,5 g/kg respectivamente, além de que mostraram comportamento similar com o aumento da profundidade, visto que os teores apresentaram a tendência de decréscimo.

As concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  variaram entre 4,37 a 5,56 cmolc/kg ( $\pm 0,45$ ), da qual o maior teor foi obtido na camada de 20 a 30 cm. Enquanto que os maiores valores de  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  foram observados na camada superficial (0 a 10 cm), e esses macronutrientes apresentaram variação de 0,45 a 0,66 cmolc/kg ( $\pm 0,10$ ) e 0,04 e 0,07 cmolc/kg ( $\pm 0,01$ ), respectivamente. De modo geral nota-se que o teor médio de  $\text{Ca}^{2+}$  é superior aos teores médios de  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  e esse comportamento é muito comum em solos de TPI, uma vez que ocorre elevada decomposição de MO (ossos de animais e espinhas de peixes), que são ricas em  $\text{Ca}^{2+}$  e P, visto que sua maior disponibilidade advém dos materiais descartados nas áreas de TPI (LIMA *et al.*, 2002; SOARES *et al.*, 2018).

Os teores de P no solo foram elevados com máximo de 1401,85 mg/kg e mínimo de 155,93 mg/kg, notou-se que sofreu alteração conforme o aumento da profundidade, o maior teor não foi observado na camada superficial (0 a 10 cm), mas na fração de 30 a 40 cm, corroborando com os resultados obtidos por Silva (2008) e Silva *et al.* (2011). A influência da profundidade na variação do P pode ser atribuída ao abandono temporário do sítio, no aumento da população ou na forma de subsistência (SJOBERG, 1976), além de que em decorrência da elevada concentração de P nas camadas mais profundas, pode ser resultado da

eluviação e das perdas por erosão assim como também pode ser atribuído ao cultivo com perda do P em superfície (LIMA, 2001).

A variação nas concentrações dos elementos  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$  foram elevados, variando na ordem de 108,5 a 307,50 mg/kg ( $\pm 78,82$ ) e 26,0 a 63,0 mg/kg ( $\pm 15,37$ ), respectivamente. Com base no desvio padrão desses elementos pode-se concluir que as frações de solo analisadas não apresentam homogeneidade em relação a eles. Acerca dos micronutrientes  $\text{Zn}^{2+}$  e  $\text{Cu}^{2+}$  observou-se que não sofreram variação elevada entre a profundidade estudada, variando entre 19,90 a 36,90 mg/kg ( $\pm 6,88$ ) e 5,60 a 7,20 mg/kg ( $\pm 0,60$ ) para  $\text{Zn}^{2+}$  e  $\text{Cu}^{2+}$  respectivamente. Comparando os resultados obtidos por Costa e Kern (1999) e Oliveira (2016) pode-se dizer que o perfil de TPI do Caiambé não apresenta elevado teor de micronutrientes, mostrando variabilidade das quantidades de nutrientes entre as TPI de diferentes localidades.

### 3.3. Fracionamento de fósforo inorgânico

A distribuição das formas de P das frações  $\text{P}_{(\text{FL})}$ ,  $\text{P}_{(\text{Al})}$ ,  $\text{P}_{(\text{Fe})}$  e  $\text{P}_{(\text{Ca})}$  podem ser observadas na Figura 4.

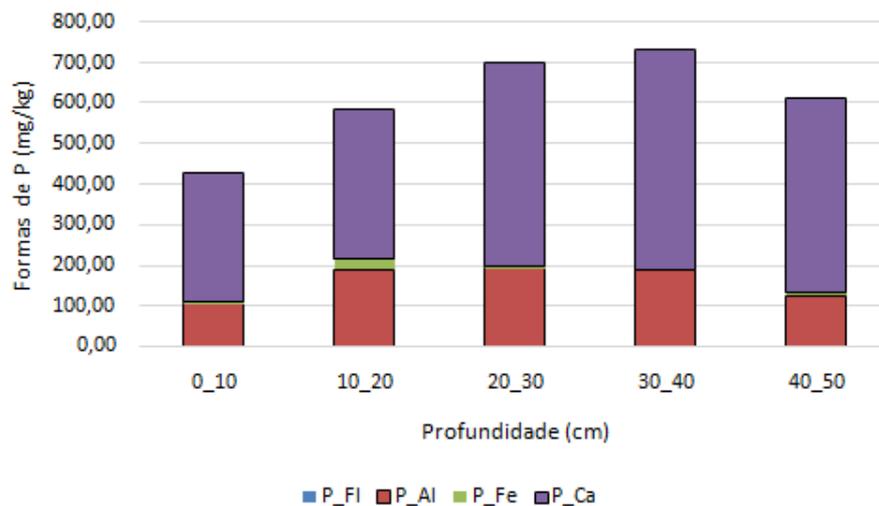


Figura 4 – Distribuição das concentrações de fósforo do fracionamento sequencial de Chang e Jackson no perfil de solo de TPI do Distrito de Caiambé

Fonte: Autoral

Foi possível observar diferenças significativas nas quantidades de cada fração, ocorrendo variação em todas as profundidades. De maneira geral, as amostras de TPI analisadas apresentam maiores teores de  $\text{P}_{(\text{Ca})}$ , seguidos pelo  $\text{P}_{(\text{Al})}$  e  $\text{P}_{(\text{Fe})}$ , sendo que o menor teor de P

observado foi no  $P_{(FL)}$  em todas as profundidades, mostrando que o P na TPI do distrito de Caiambé é adsorvido em baixa quantidade na superfície dos colóides minerais do solo.

O maior teor de  $P_{(Fe)}$  obtido neste estudo foi na camada de 10 a 20 cm, entretanto demonstram serem concentrações baixas diante das concentrações de  $P_{(Ca)}$  e  $P_{(Al)}$ . Haja vista que as concentrações de  $P_{(Ca)}$  são elevadas, possivelmente, apenas certa quantidade de P do perfil de TPI analisada sofreu eluviação, pois de acordo com Bahia Filho e Braga (1975), solos com alto grau de intemperismo, associado à eluviação, tendem a converter as formas de  $P_{(Ca)}$  em  $P_{(Al)}$  e  $P_{(Fe)}$ .

Acerca do  $P_{(Al)}$  observou-se que este apresentou comportamento semelhante ao  $P_{(Ca)}$  até a camada de 10 a 20 cm. A partir desse horizonte o teor de  $P_{(Al)}$  se manteve quase constante até a camada de 30 a 40 cm, enquanto que as concentrações de  $P_{(Ca)}$  aumentaram gradativamente com a profundidade. Por outro lado, comportamento diferenciado foi observado por Pessoa Junior (2016), os resultados obtidos demonstraram que o teor de  $P_{(Al)}$  é inversamente proporcional as concentrações de  $P_{(Ca)}$ , levando em consideração a influência do grau de intemperismo do solo, possibilitando relação inversa entre as concentrações de  $P_i$ .

A alta concentração de  $P_{(Ca)}$  pode estar associada à incorporação no solo de materiais orgânicos ricos em P e Ca, como a hidroxiapatita biogênica. Nota-se que a maior concentração dessa fração localiza-se na camada de 30 a 40 cm, o que pode estar relacionado na forma com que esses detritos foram descartados, provavelmente foram enterrados em diferentes profundidades, ocasionando na distribuição desuniforme destes nutrientes no perfil do solo. Dessa forma, explicando o menor teor de  $P_i$  no horizonte superficial (0 a 10 cm) (SCHAEFER *et al.*, 2004; MOLINE *et al.*, 2016)

A somas das frações inorgânicas de P estudadas, demonstra ser inferior ao valor de P disponível extraído pelo Mehlich-1 (Tabela 2). Pessoa Junior e Santana (2017) discutiram esse comportamento atribuindo este fato as diferentes formas que este extrator pode obter, que vai além de  $P_{(FL)}$ ,  $P_{(Al)}$ ,  $P_{(Fe)}$  e  $P_{(Ca)}$ , pois abrange também o P ligado a diferentes nutrientes ( $P_{(Mn)}$  e  $P_{(Zn)}$ ), assim como também extrai o P orgânico, evidenciando a possível superestimação do P disponível.

### 3. Conclusão

As concentrações de MO e N total sofreram influência da profundidade, dado que os teores obtidos apresentaram a tendência de decréscimo conforme o aumento da profundidade. De maneira oposta, as concentrações de P disponível aumentaram com o aumento da

profundidade e os resultados da obtenção dos macro e micronutrientes demonstraram variabilidade nas diferentes camadas no perfil de TPI estudada.

Com o fracionamento do Pi, a forma de P que apresentou maior teor em todas as camadas foi a de  $P_{(Ca)}$ , decorrente, principalmente, do material descartado durante a formação do solo. Enquanto que as menores concentrações obtidas foram nas formas de  $P_{(Fe)}$  e  $P_{(FL)}$ . Dentre as frações estudadas, apenas o  $P_{(Ca)}$  e o  $P_{(FL)}$  sofreram influência da profundidade, pois à medida do aumento na profundidade observou-se aumento na concentração.

### **Agradecimentos**

A Universidade do Estado do Amazonas – CEST, pela oportunidade e qualidade de ensino no curso.

Aos professores do Centro de Estudos Superiores de Tefé pelos ensinamentos transmitidos e o aprendizado adquirido durante a realização da graduação.

Ao professor orientador e grande amigo Doutor Erasmo Sérgio Ferreira Pessoa Junior pela amizade e todos os ensinamentos no período de orientação.

Ao Fundo de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pela concessão da bolsa de pesquisa.

À Laura Cristina Pereira de Oliveira e sua equipe de técnicos do Laboratório Temático de Solos e Plantas do INPA.

Aos meus colegas de Laboratório que contribuíram nos momentos das análises.

À minha mãe pela solidariedade e pelo carinho e a toda a minha família pelo apoio e incentivo.

A todos os meus amigos e aqueles que de alguma forma participaram de mais esta conquista.

## Referências

- BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M. Fósforo em latossolo do Estado de Minas Gerais - II: quantidade de fósforo disponível. **Revista Ceres**, v. 22, n. 119, p. 50 - 61, 1975.
- BARROS, K. R. M. *et al.* Fracionamento químico da matéria orgânica e caracterização física de Terra Preta de Índio. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 55, n. 1, p. 44–51, 2012.
- BOITT, G. **Mineralogia e distribuição das formas de fósforo em Latossolos com diferentes graus de intemperismo**. Universidade do Estado de Santa Catarina: Lages - SC, 2014, [Dissertação de Mestrado].
- CAMPOS, M. C. C. *et al.* Caracterização e classificação de Terras Pretas Arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 598–609, 2011.
- CAMPOS, M. C. C. *et al.* Caracterização física e química de Terras Pretas Arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Agro@ambiente**, v. 6, n. 2, p. 102 – 109, 2012.
- CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, v. 84, n. 2, p. 133–44, 1957.
- COSTA, M. L.; KERN, D. C. Geochemical signatures of tropical soils with Archaeological Black Earth in the Amazon, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 66, p. 369–85, 1999.
- EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de análise do solo**. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. 2 ed. Rio de Janeiro, 1999.
- FALCÃO, N. P. S.; BORGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawái (*Caricacarpaya L.*). **Acta Amazônica**, v. 36, p. 401 – 406, 2006.
- FALCÃO, N.; MOREIRA, A.; COMENFORD, N. B. **A fertilidade dos solos de Terra Preta de índio da Amazônia Central**. In: TEIXEIRA, W. G. *et al.* As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 189 – 200.
- FALCÃO, N. P. S.; COMERFORD, N. B.; LEHMANN, J. **Determining Nutrient Bioavailability of Amazonian Dark Earth Soil Methodological Challenges**. In: LEHMANN, J. *et al.* Amazon Dark Earth, origin, properties and management. Holanda, v. 1, p. 255 – 270, 2003.
- GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; SANTOS, D. R. dos. Modificações nas formas de fósforo do solo após extrações sucessivas com Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 363 – 371, 2005.
- GERMAN, L. A. Ecological praxis and black water ecosystems: a case study from the Brazilian Amazon. **Human Ecology**, v. 32, n. 6, p. 653–83, 2004
- GLASER, B. *et al.* The Terra Preta phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, n. 1, p. 37 – 41, 2001.
- LEHMANN, J. *et al.* **Sequential P fractionation of relict Anthropogenic Dark Earths of Amazonia**. In: GLASER, B.; WOODS, W. I. Amazonian Dark Earths: exploration in space and time. Berlin: Springer-Verlag, 2004, p. 113 – 124.
- LIMA, H. N. *et al.* Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian Black Earth”) of Western Amazonia. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110, p. 1 – 17, 2002.

- LIMA, H. N. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**. Universidade Federal de Viçosa: Viçosa - MG, 2001 [Tese de Doutorado].
- LOPES, A. S. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2 ed. São Paulo: Piracicaba, 1998.
- MACEDO, R. S. **Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos com horizonte antrópico (terra preta de índio) em áreas de várzea do Rio Solimões**, Universidade Federal do Amazonas: Manaus – AM, 2009 [Dissertação de Mestrado].
- MADARI, B. E. et al. **Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo**. In: TEIXEIRA, W. G. et al. As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 172 – 188.
- MANAHAN, S. E. **Química Ambiental**. 9 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013
- MASINI, J. C. Demonstrando os fundamentos, potencialidades e limitações da análise por injeção sequencial. **Química Nova**, v. 31, p. 704 – 708, 2008.
- MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH<sub>4</sub> by North Carolina Soil Testing Laboratoris**. Raleigh: University of North Carolina, 1953.
- MOLINE, E. F. da V. **Formas de fósforo, substâncias húmicas e nitrogênio inorgânico em áreas da Amazônia ocidental**. Universidade Estadual Paulista: Jabotical – SP, 2016 [Tese de Doutorado].
- MOREIRA, A.; TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C. Extratores e disponibilidade de micronutrientes em solos antrópicos da Amazônia. **Ciencia Del Suelo**, Argentina, v. 37, n. 1, p. 127 – 134, 2009.
- MOREIRA, A. Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia Ocidental. **Bragantia**, v. 66, n. 2, p. 307 – 315, 2007.
- NOVAIS, R.; KAMPRATH, E. J. Phosphorus supplying capacities of previously heavily fertilized soils. **Soil Science Society of America Journal**. v. 42, n. 6, p. 931–5, 1978.
- PESSOA JUNIOR, E. S. F. **Estudo dos métodos de extração e comportamento do fósforo na Terra Preta Arqueológica da mesorregião central do estado do Amazonas**. Universidade do Estado do Amazonas: Manaus – AM, 2016 [Tese de Doutorado].
- PESSOA JÚNIOR, E. S. F.; SANTANA, G. P. Uma abordagem sobre fósforo em Terra Preta Arqueológica, **Scientia Amazonia**, v. 6, n. 1, p. 61 – 70, 2017.
- PESSOA JUNIOR, E. S. F. *et al.* Terra preta de índio na região Amazônica. **Scientia Amazonia**, v. 1, n. 1, p. 1 – 8, 2012.
- PESSOA JÚNIOR E. S. F. **Uso de técnicas de extração de fósforo em solos antrópicos da Amazônia**. Universidade do Estado do Amazonas: Manaus – AM, 2011 [Dissertação de Mestrado].
- PIERZYNSKI, G. M. **Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters**. North Carolina: North Carolina State University, 2000.
- OLIVEIRA, A. F. **Os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 na determinação de fósforo em Terra Preta de Índio**. Universidade do Estado do Amazonas: Tefé – AM, 2017 [TCC de graduação].

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 345 – 354, 2000.

ROCHA, A. T. da *et al.* Fracionamento do fósforo e avaliação de extratores do P-disponível em solos da Ilha de Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.2, p.178-184, 2005.

ROTTA, L. R. **Fracionamento e disponibilidade de fósforo em uma cronosequência de cultivos sob plantio direto**. Universidade Federal de Goiás: Jataí – GO, 2012 [Dissertação de Mestrado].

SANTOS, D. R. dos; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 576 – 586, 2008.

SCHAEFER, C. E. G. R. *et al.* Micromorphology and electron microprobe analysis of phosphorus and potassium forms of an Indian Black Earth (IBE) Anthrosol from Western Amazonia. **Australian Journal of Soil Research**, v. 42, p. 401 – 409, 2004.

SILVA, F. W. R. **Caracterização química e mineralogia de solos antrópicos da Amazônia (Terras Pretas de Índio) entre Coari-Manaus-AM**. Universidade Federal do Amazonas: Manaus – AM, 2008 [Dissertação de Mestrado].

SILVA, F. C. da; RAIJ, B. V. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 267-288, 1999.

SILVA, M. A. da *et al.* Frações de fósforo em latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 10, p. 1197-1207, 2003.

SILVA F. W. R. *et al.* Caracterização química e mineralogia de solos antrópicos (terras pretas de índio) na Amazônia central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 673 – 681, 2011.

SJOBERG, A. Phosphate Analysis of Anthropogenic Soils. **J F Archaeol.** v. 3, n. 4, p. 447–54, 1976.

SOARES, R. **Agregação e distribuição da matéria orgânica em solos de Terra Preta de Índio da Amazônia Central**. Universidade Federal Fluminense: Niterói – RJ, 2007 [Dissertação de Mestrado].

SOARES, M. D. R. *et al.* Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 4, p. 434 – 441, 2015.

SOARES, R. *et al.* O papel das Terras Pretas de Índio no Antropoceno. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 6, p. 1659 – 1692, 2018.

SOUZA, K. W. *et al.* Phosphorous forms in cultivated Indian Black Earth (anthrosols) of varying texture in the Brazilian Amazon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1347-1355, 2009.

SOUZA, K. W. **Gênese, mineralogia, micromorfologia e formas de fósforo em arqueo-antropossolos da várzea do Rio Amazonas**. Universidade Federal de Viçosa: Viçosa – MG, 2011 [Tese de Doutorado].

TEIXEIRA, W. G.; LIMA, R. A. **O solo modificado pelo homem (solo antrópico) como artefato arqueológico**. In: SEMINÁRIO PRESERVAÇÃO DE PATRIMÔNIO ARQUEOLÓGICO. Rio de Janeiro: Museu de Astronomia e Ciências Afins, 2016. p. 123-147. [Anais de evento].

TEIXEIRA, W. G. et al. **As propriedades físicas e hídricas dos Horizontes Antrópicos das Terras Pretas de Índio na Amazônia Central.** *In:* TEIXEIRA, W. G. *et al.* As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 242-250.