Características físicas e químicas de solos com ocorrência de horizonte A antrópico e áreas adjacentes no sudoeste da Amazônia brasileira

Stella Cristiani Gonçalves Matoso[1], Gabriella Santana de Souza[2], Raquel Geike Luxinger Magalhães[2], Paulo Guilherme Salvador Wadt[3]

[1] Professora do Instituto Federal de Rondônia, *Campus* Colorado do Oeste; [2] Engenheira Agrônoma egressa do Instituto Federal de Rondônia, *Campus* Colorado do Oeste; [3] Pesquisador da Embrapa Rondônia.

RESUMO

As Terras Pretas de Índio são manchas de solos escuros encontradas na região Amazônica, que apresentam alta fertilidade, e tem sua origem associada a deposição de restos vegetais e animais ocasionadas por populações pré-históricas. Objetivou-se com esse estudo comparar as características físicas e químicas do horizonte superficial antrópico de solos caracterizados como Terra Preta de Índio com horizonte superficial não antrópico dos solos de áreas adjacentes a sua ocorrência natural. Para isso foram coletadas amostras de três profundidades (0-10,10-20 e 20-30 cm) das áreas de Terrra Preta de Índio e de suas áreas adjacentes em quatro locais: Itapoã do Oeste, Rolim de Moura, Cabixi e Vila Neide. Análises físicas e químicas foram realizadas. Os horizontes antrópicos apresentam menor densidade do solo e maior porosidade total do solo do que os não antrópicos. As Terras Pretas possuem maior teor de fósforo disponível, cálcio e magnésio trocável e pH do que as áreas adjacentes. As Terras Pretas também apresentam alto potencial para o sequestro de carbono.

PALAVRAS-CHAVE: Carbono. Terra Preta de Índio. Rondônia.

ABSTRACT

The Anthropogenic Dark Earths are dark soil found in the Amazon region that have high fertility and their origin is associated with the deposition of plant and animal remains caused by prehistoric populations. The objective of this study was to compare the physical and chemical characteristics of the superficial anthropic horizon of soils characterized as Anthropogenic Dark Earth with a non-anthropic superficial horizon of soils from areas adjacent to their natural occurrence. For that, samples of three depths (0-10, 10-20, and 20-30 cm) were collected from the areas of Amazonian Dark Earth and its adjacent areas in four locations: Itapoã do Oeste, Rolim de Moura, Cabixi, and Vila Neide. Physical and chemical analyzes were performed. The anthropic horizons have lower soil density and higher total soil porosity than non-anthropic horizons. The Anthropogenic Dark Earths have a higher content of available phosphorus, exchangeable calcium and magnesium and pH than the adjacent areas. Amazonian Dark Earths also have a high potential for carbon sequestration.

KEY WORDS: Carbon. Anthropogenic Dark Earths. Rondônia.

INTRODUÇÃO

Os solos da região amazônica são caracterizados como pobres em nutrientes, com elevada acidez e baixa capacidade de troca catiônica (CTC), e, consequentemente, como de baixa fertilidade. No entanto, é notável que os solos dessa região não atendem essa visão

generalista, existindo grande variabilidade em suas características, relacionadas à pedogênese (QUESADA et al., 2011).

Esses argumentos são corroborados pela ocorrência, na região amazônica, de solos de coloração escura denominados de Terra Preta de Índio (TPI) ou Terra Preta, que apresentam horizonte A antrópico ou arqueo – antropedeogênico (Au) (SOARES et al., 2018). As áreas com TPIs podem ser encontradas em diversas ordens de solos, tais como, Latossolos, Argissolos, Cambissolos, Nitossolos e Plintossolos (BOIXADEIRA et al., 2020; LIMA, 2001).

A hipótese mais aceita sobre a origem desses solos é de que povos pré-colombianos tenham contribuído para formação das TPIs de modo não intencional (KÄMPF et al., 2003; MACEDO et al., 2019). Acredita-se que esses locais eram utilizados como residências desses povos e existiam áreas que serviam como lixões ou depósitos de resíduos, onde eram descartados resíduos de origem animal (sangue, osso, fezes, conchas, etc.) e de origem vegetal (cascas, sementes, folhas, caules) (WOODS; MCCANN, 2001).

Quando se compara a fertilidade da TPI em relação a suas áreas adjacentes, observa-se na primeira, maior teor de carbono, cálcio e magnésio trocáveis, fósforo e potássio disponíveis, e pH mais alto (CAMPOS et al., 2012). As altas quantidades e as propriedades físicos-químicas da matéria orgânica da TPI são os principais responsáveis pela alta fertilidade e pela resiliência dessa fertilidade (CUNHA et al., 2009).

É válido ressaltar que uma proporção significativa, até 35-45%, do carbono nas TPI está na forma de carbono pirogênico, comparado a apenas 14% em solos circunvizinhos sem horizonte antrópico, e 48 a 59% deste encontra-se na fração leve da matéria orgânica do solo (GLASER et al., 2000). Para González-Pérez et al. (2004) o carbono pirogênico pode ser entendido como "um contínuo entre materiais de plantas parcialmente carbonizadas, tais como carvão e material grafítico e partículas de fuligens condensadas na fase gasosa".

Atualmente existem diversos estudos registrando a existências de sítios de TPIs na Amazônia, no entanto em Rondônia o conhecimento sobre essas áreas é bastante restrito, fazendo com que exista necessidade de se estudar e caracterizar esses sítios para que possam registrar suas existências no Estado.

Em face do exposto, o objetivo deste estudo foi comparar as características físicas e químicas do horizonte superficial de solos caracterizados como Terra Preta de Índio com os solos de áreas adjacentes a sua ocorrência natural.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionadas quatro áreas com ocorrência de TPI, caracterizadas pela presença do horizonte A antrópico (EMBRAPA, 2018), situadas em regiões fitogeográficas distintas do Estado de Rondônia. Desse modo, a coleta dos solos ocorreu nos municípios de Itapoã do Oeste, Rolim de Moura e Cabixi, nesse último foram selecionadas duas áreas uma próxima a cede do município e outra próxima ao distrito Vila Neide, que fica às margens do Rio Guaporé. Para distinguir as duas localidades, a primeira foi chamada de Cabixi e a segunda de Guaporé (Figura 1).

O estado de Rondônia está inserido na região amazônica, que possui um clima tropical quente e úmido, com um período seco bem definido e precipitação pluviométrica média anual de 2.300 mm e temperatura de 24°C e 26°C, com temperatura máxima de até 35 °C. O Estado sofre a ação de sistemas frontais (denominados localmente por Friagens) que podem levar a temperaturas mínimas absolutas do ar inferiores à 10°C. Desse modo

Rondônia possui maior amplitude térmica sazonal e diária do que os demais Estados amazônicos (FISCH et al., 1998). A vegetação predominante é Floresta Tropical subperenifolia, com inserções de vegetação típica do Cerrado subcaducifolia (SANTOS et al., 2015).

A amostragem foi realizada nos sítios de TPI e em suas áreas adjacentes, na mesma cota de relevo. Portanto, os horizontes analisados foram denominados como A antrópico, nos sítios de TPI e A não antrópico nas áreas adjacentes. Foram coletadas amostras deformadas e inderformadas, nas profundidades de 0-10; 10-20 e 20-30 cm, com três repetições. O experimento seguiu um arranjo fatorial 4x2x3, que corresponde respectivamente a quatro localidades, dois tipos de horizontes e três profundidades de amostragem.

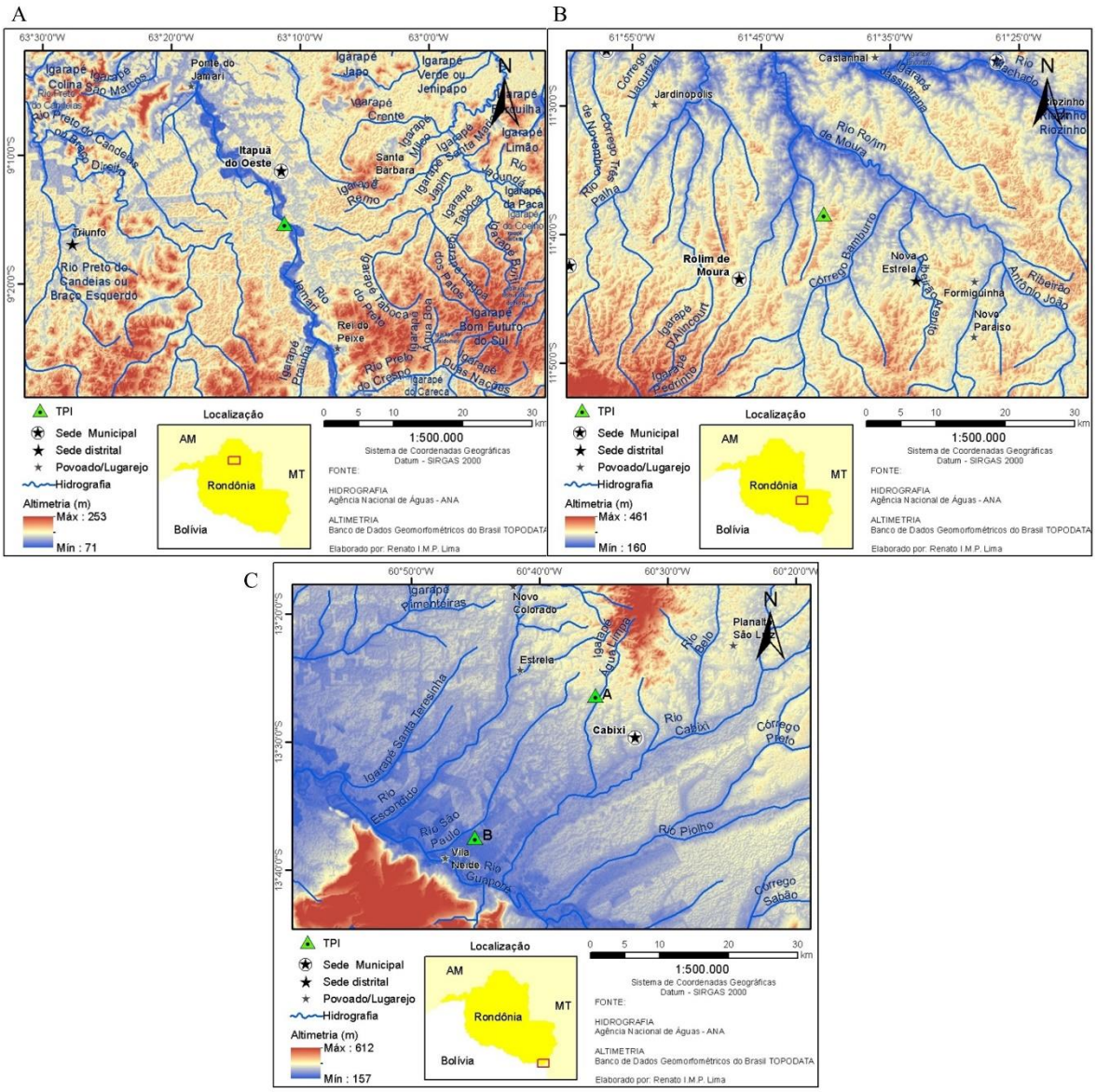

Figura 1 – Localização das áreas de estudo no Estado de Rondônia, Sudoeste da Amazônia. A: Itapuã do Oeste; B: Rolim de Moura; C: Cabixi e Guaporé.

Todas as áreas amostradas estão sob uso agrícola atual. Os solos (TPI e área adjacente) de Itapoã são cultivados com espécies frtuíferas, como manga (*Mangifera indica*) e coco *(Cocos nucifera*). Os solos de Cabixi e Guaporé são cultivados com pastagens (*Urochloa brizantha*). Em Rolim de Moura no sítio de TPI cultiva-se um pomar de *Citrus* sp. e na área adjacente a cultura do milho (*Zea mays*). Portanto, as siglas usadas para os horizontes superficiais foi Aup para os horizontes antrópicos e Ap para os horizontes não antrópicos.

Realizou-se a caracterização física e química das amostras para a obtenção das variáveis. A densidade do solo (Ds) foi determinada pelo método do anel volumétrico, a densidade de partículas (Dp) foi obtida com o uso de balão volumétrico e álcool etílico e, a partir dos resultados dessas duas variáveis, foi calculada a porosidade total do solo (Pt) (TEIXEIRA et al., 2017).

Para a realização das análises químicas, as amostras foram secas em estufa à 40 °C, depois maceradas e tamisadas em malha de 2 mm, obtendo-se desse modo a terra fina seca em estufa (TRFE) (TEIXEIRA et al., 2017). O pH foi determinado em uma proporção de 1:2,5 (sólido:água). A granulometria foi obtida pelo método do densímetro (TEIXEIRA et al., 2017), apenas como caracterização (Tabela 1).

O cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) trocáveis foram extraídos com solução de KCl (1 M). Ca e Mg foram determinados por titulometria com sal dissódico de EDTA 0,0125 M, e o Al^{3+} com NaOH (0,025 M) . A acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$) foi aferida por meio de extração com acetato de cálcio (0,5 M, a pH 7,0) e quantificada por titulação com NaOH (0,025 M) (TEIXEIRA et al., 2017).

Fósforo (P) e potássio (K) disponíveis foram extraídos por Mehlich 1. O K foi quantificado por fotometria de chama e o P por colorimetria. O carbono orgânico total (CO) foi determinado a partir do princípio da oxidação via úmida, com solução de dicromato de potássio em presença de ácido sulfúrico, utilizando como catalisador da oxirredução o calor desprendido na diluição do ácido sulfúrico e titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal. A capacidade de troca catiônica (T), soma de bases (S), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m) foram determinadas indiretamente por meio de cálculo (TEIXEIRA et al., 2017).

O estoque de carbono nas diferentes profundidades do solo foi estimado como proposto por Fernandes e Fernandes (2009), pela seguinte expressão:

$$EC = (CO \times Ds \times e)/10$$

onde:
EC: estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg ha^{-1}); CO: teor de carbono orgânico total na profundidade amostrada (g kg^{-1}); Ds: densidade do solo da profundidade (g cm^{-3}); e: espessura da camada considerada (cm).

A análise estatística iniciou-se com a verificação de dados discrepantes (outliers) pelo teste de Grubbs, de normalidade dos erros pelo teste de Shapiro-Wilk e de homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett. Em seguida, realizou-se a análise de variância para verificar os efeitos isolados (independentes) e/ou combinados (interação) dos locais, tipos de horizontes e profundidades do solo. Em seguida, comparou-se as médias pelo teste de Scott-Knott. Além disso, realizou a análise de correlação de Pearson entre as variáveis.

Tabela 1 – Análise granulométrica em horizonte A antrópico e A não antrópico, sob diferentes locais e profundidades no Sudoeste da Amazônia

Local	Horizonte	Profundidade	Granulometria		
			Areia	Silte	Argila
			%		
Itapoã	Ap	0-10	65	11	24
		10-20	57	10	33
		20-30	56	11	33
	Aup	0-10	60	10	30
		10-20	56	11	33
		20-30	57	10	33
Rolim de Moura	Ap	0-10	60	14	26
		10-20	55	10	35
		20-30	58	11	30
	Aup	0-10	60	10	30
		10-20	58	11	30
		20-30	57	10	33
Cabixi	Ap	0-10	35	10	54
		10-20	29	10	60
		20-30	29	10	60
	Aup	0-10	51	10	39
		10-20	48	10	42
		20-30	45	10	45
Guaporé	Ap	0-10	75	10	15
		10-20	78	10	12
		20-30	80	6	14
	Aup	0-10	75	10	15
		10-20	72	10	18
		20-30	75	8	17

RESULTADOS

A densidade de partículas não foi influenciada ($p > 0,05$) por nenhum dos tratamentos isolados ou combinados (Tabela 2). O carbono orgânico total, a soma de bases e o estoque de carbono tiveram efeito significativo dos tratamentos isolados (Tabelas 2, 3 e 4). Nas áreas de Itapoã, Rolim de Moura e Cabixi observaram-se maiores ($p < 0,05$) médias de carbono orgânico total e estoque de carbono do que na área do Guaporé (Tabela 2). O horizonte A antrópico (Aup) apresentou maior ($p < 0,05$) teor de carbono orgânico total, soma de bases e estoque de carbono quando comparado ao horizonte não antrópico (Ap) (Tabela 3). O

carbono orgânico total decresceu ($p < 0,05$) com aumento em profundidade do solo (Tabela 4).

Tabela 2 – Carbono orgânico total (CO), densidade de partículas (Dp), soma de bases (S) e estoque de carbono (EC) nas diferentes localidades estudadas no Sudoeste da Amazônia

Local	CO	S	Dp	EC
	g kg^{-1}	$cmol_c$ kg^{-1}	g cm^{-3}	Mg ha^{-1}
Itapoã	40,03a	1,48a	2,49a	50,83a
Rolim de Moura	32,73a	0,74a	2,51a	34,14a
Cabixi	34,46a	0,98a	2,39a	36,81a
Guaporé	16,04b	0,71a	2,31a	18,88b

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Tabela 3 – Carbono orgânico total (CO), densidade de partículas (Dp), soma de bases (S) e estoque de carbono em solos com presença de horizonte A antrópico e A não antrópico no Sudoeste da Amazônia

Horizonte	CO	S	Dp	EC
	g kg^{-1}	$cmol_c$ kg^{-1}	g cm^{-3}	Mg ha^{-1}
Ap	20,78b	0,27b	2,49a	25,30b
Aup	40,86a	1,69a	2,36a	45,03a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Tabela 4 – Carbono orgânico total (CO), densidade de partículas (Dp), soma de bases (S) e estoque de carbono nas diferentes profundidades estudadas no Sudoeste da Amazônia

Profundidade (cm)	CO	S	Dp	EC
	g kg^{-1}	$cmol_c$ kg^{-1}	g cm^{-3}	Mg ha^{-1}
0-10	39,73a	1,16a	2,51a	43,93a
10-20	28,34b	0,75a	2,38a	33,49a
20-30	24,38b	1,02a	2,38a	28,01a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a de 5% de probabilidade.

As variáveis pH, acidez potencial e capacidade de troca de cátions obtiveram interação ($p < 0,05$) entre dois fatores, local e tipo de horizonte (Tabelas 5 e 6). Com relação à acidez potencial (H + Al), constatou-se maior ($p < 0,05$) valor dessa propriedade no horizonte A não antrópico dos municípios de Itapoã e Rolim de Moura (Tabela 6). No horizonte A antrópico a área de Itapoã foi superior ($p < 0,05$) às demais. No entanto, quando observada a acidez potencial dos horizontes de cada local constatou-se que apenas para Rolim de Moura e Guaporé houve diferença significativa na acidez potencial do A não antrópico para o A antrópico. Em relação à capacidade de troca catiônica também apresentada na Tabela 6, percebe-se que no horizonte A não antrópicp, Guaporé obteve a menor ($p < 0,05$) média e no horizonte A antrópico Itapoã foi superior ($p < 0,05$) aos demais.

Na Tabela 5 verifica-se que ocorreu diferença significativa entre os horizontes A antrópico e A não antrópico em todas as áreas, sendo que o horizonte antrópico apresentou maior valor de pH. Observa-se ainda que a melhor combinação entre horizontes e localidades ocorreu no A antrópico de Cabixi, obtendo valor de pH de 6,60. Comparando apenas o horizonte A não antrópico entre as localidades, nota-se que Cabixi e Guaporé apresentaram pH mais elevado que as demais. A mesma tendência se repete para a interação entre

localidades e profundidades. Cabixi e Guaporé apresentaram maior pH que as demais áreas nas três profundidades (0-10, 10-20 e 20-30 cm).

Tabela 5 – pH obtido em função da interação entre localidade e tipo de horizonte e entre localidade e profundidade do solo no Sudoeste da Amazônia

Local	Horizontes	
	Ap	Aup
Itapoã	4,38bB	5,57bA
Rolim de Moura	4,66bB	5,98bA
Cabixi	5,03aB	6,60aA
Guaporé	5,12aB	5,79bA
	Profundidades (cm)	
	0-10	10-20	20-30
Itapoã	4,91bA	5,01bA	4,98cA
Rolim de Moura	5,21bA	5,30bA	5,44bA
Cabixi	5,76aA	5,83aA	5,86aA
Guaporé	5,41aA	5,53aA	5,42bA

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Tabela 6 – Acidez potencial (H+AL) e capacidade de troca catiônica (T) obtidas em função da interação entre localidade e tipo de horizonte

Local	H+AL ($cmol_c\ kg^{-1}$)		T ($cmol_c\ kg^{-1}$)	
	Ap	Aup	Ap	Aup
Itapoã	6,96aA	6,83aA	7,31aA	9,44aA
Rolim de Moura	6,34aA	4,26bB	6,60aA	5,50bA
Cabixi	4,67bA	3,25bA	4,90aA	4,98bA
Guaporé	1,94cB	4,21bA	2,17bB	5,40bA

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

As variáveis fósforo e potássio disponíveis; cálcio e magnésio trocáveis; densidade do solo e porosidade total apresentaram interação significativa entre os três fatores (Tabelas 7, 8 e 9). Desse modo, a comparação foi realizada entre tipo de horizonte A e profundidades do solo, dentro de cada localidade. Em todos os municípios a presença do horizonte A antrópico proporcionou teor de fósforo significativamente maior do que o horizonte A não antrópico, em todas as profundidades. Em todos os municípios houve diferença significativa entre as profundidades no horizonte A antrópico, entretanto a tendência dos resultados não foi semelhante. Na área de Itapoã e Cabixi a profundidade de 20-30 cm obteve menor ($p < 0,05$) teor de fósforo que as demais. Em Rolim de Moura a camada de 10-20 cm foi superior ($p < 0,05$), enquanto no Guaporé esse resultado ocorreu na seção de 20-30 cm (Tabela 7).

Ainda na Tabela 7, são apresentados os resultados de potássio disponível. Em Itapoã não houve diferença significativa entre horizontes e profundidades. Enquanto nas demais localidades, no horizonte A antrópico, a camada superficial (0-10 cm) apresentou maior ($p < 0,05$) teor de potássio. Na área de Cabixi o horizonte antrópico obteve potássio mais elevado ($p < 0,05$) que o horizonte A não antrópico em todas as profundidades. Em Guaporé o resultado foi inverso entre os tipos de horizonte, porém apenas na profundidade de 10-20 cm.

Tabela 7 – Fósforo (P) e potássio (K) disponíveis obtidos em função da interação entre local, tipo de horizonte A e profundidade do solo no Sudoeste da Amazônia

Local	Horizonte	P (mg kg^{-1})			K ($cmol_c$ kg^{-1})		
		0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Itapoã	Ap	4,17bA	6,06bA	6,75bA	0,12aA	0,08aA	0,09aA
	Aup	148,33aA	135,51aA	51,68aB	0,09aA	0,03aA	0,07aA
Rolim de Moura	Ap	4,83bA	2,08bA	2,01bA	0,16aA	0,10aA	0,05aA
	Aup	198,88aB	330,07aA	174,48aB	0,20aA	0,08aB	0,04aB
Cabixi	Ap	1,14bA	1,55bA	2,08cA	0,14bA	0,07bA	0,04bA
	Aup	584,54aA	630,68aA	429,81aB	0,72aA	0,22aB	0,27aB
Guaporé	Ap	3,15bA	1,13bA	1,83bA	0,20aA	0,18aA	0,14aA
	Aup	145,94aC	222,27aB	355,63aA	0,23aA	0,09bB	0,07aB

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, dentro de uma mesma localidade, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Tabela 8 – Cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis obtidos em função da interação entre localidade, tipo de horizonte A e profundidade do solo no Sudoeste da Amazônia

Local	Horizonte	Ca ($cmol_c$ kg^{-1})			Mg ($cmol_c$ kg^{-1})		
		0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Itapoã	Ap	0,32bA	0,16bA	0,12bA	0,02bA	0,02bA	0,10bA
	Aup	1,95aA	1,91aA	2,69aA	0,23aA	0,32aA	0,54aA
Rolim de Moura	Ap	0,20aA	0,04bA	0,05bA	0,11bA	0,04bA	0,02bA
	Aup	0,27aA	0,30aA	0,20aA	1,53aA	0,67aB	0,42aB
Cabixi	Ap	0,06bA	0,04bA	0,04bA	0,20bA	0,05bA	0,05bA
	Aup	0,59aA	0,59aA	0,60aA	0,99aA	0,67aA	0,53aB
Guaporé	Ap	0,04bA	0,01bA	0,01bA	0,10bA	0,03bA	0,01bA
	Aup	0,21aA	0,16aB	1,88aA	0,59aA	0,19aB	0,15aB

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, dentro de uma mesma localidade, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Tabela 9 – Densidade do solo (Ds) e porosidade total (PT) obtidas em função da interação entre localidade, tipo de horizonte e profundidade do solo no Sudoeste da Amazônia

Local	Horizonte	Ds (g cm^{-3})			Pt (%)		
		0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Itapoã	Ap	1,27aA	1,34aA	1,43aA	53,59aA	42,57bB	44,49bB
	Aup	1,36aA	1,06bB	1,06bB	47,11aA	55,31aA	51,62aA
Rolim de Moura	Ap	1,04aA	1,23aA	1,03bA	59,56aA	51,94aB	60,98aA
	Aup	0,85bB	1,24aA	1,22aA	65,37aA	50,74aB	47,74aB
Cabixi	Ap	1,07aA	1,12aA	0,98aA	54,74aA	49,20aA	55,53aA
	Aup	1,11aA	1,11aA	1,04aA	53,87aA	55,46aA	57,57aA
Guaporé	Ap	1,38aA	1,34aA	1,50aA	42,82bA	43,72bA	40,50ba
	Aup	0,99bA	1,08bA	0,98bA	56,69aA	50,97aA	50,89aA

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, dentro de uma mesma localidade, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Houve diferença significativa para dos teores de cálcio e magnésio trocáveis entre os tipos de horizontes, sendo que o horizonte A antrópico apresentou teores mais elevados. O

cálcio apresentou maior homogeneidade entre as profundidades, já o magnésio foi maior nas camadas superficiais (Tabela 8).

Com relação às variáveis físicas dos solos, apenas a área de Cabixi não apresentou diferença significativa entre os horizontes e profundidades para densidade do solo e porosidade total. Em Itapoã, Rolim de Moura e Guaporé a densidade do solo foi menor ($p < 0,05$) no horizonte A antrópico e a porosidade total mais elevada ($p < 0,05$), na maior parte das profundidades avaliadas (Tabela 9).

Os resultados sobre a correlação entre as variáveis são apresentados na Figura 2. Observou-se correlação positiva ($p < 0,05$) próxima de 1,0 entre pH e P disponível, carbono orgânico e estoque de carbono, carbono orgânico e magnésio trocável, acidez potencial e capacidade de troca de cátions, hidrogênio e capacidade de troca de cátions, e cálcio e soma de bases. Verificou-se correlação negativa ($p < 0,05$) próxima de -1,0 entre pH e alumínio trocável, e densidade do solo e porosidade total do solo (Figura 2).

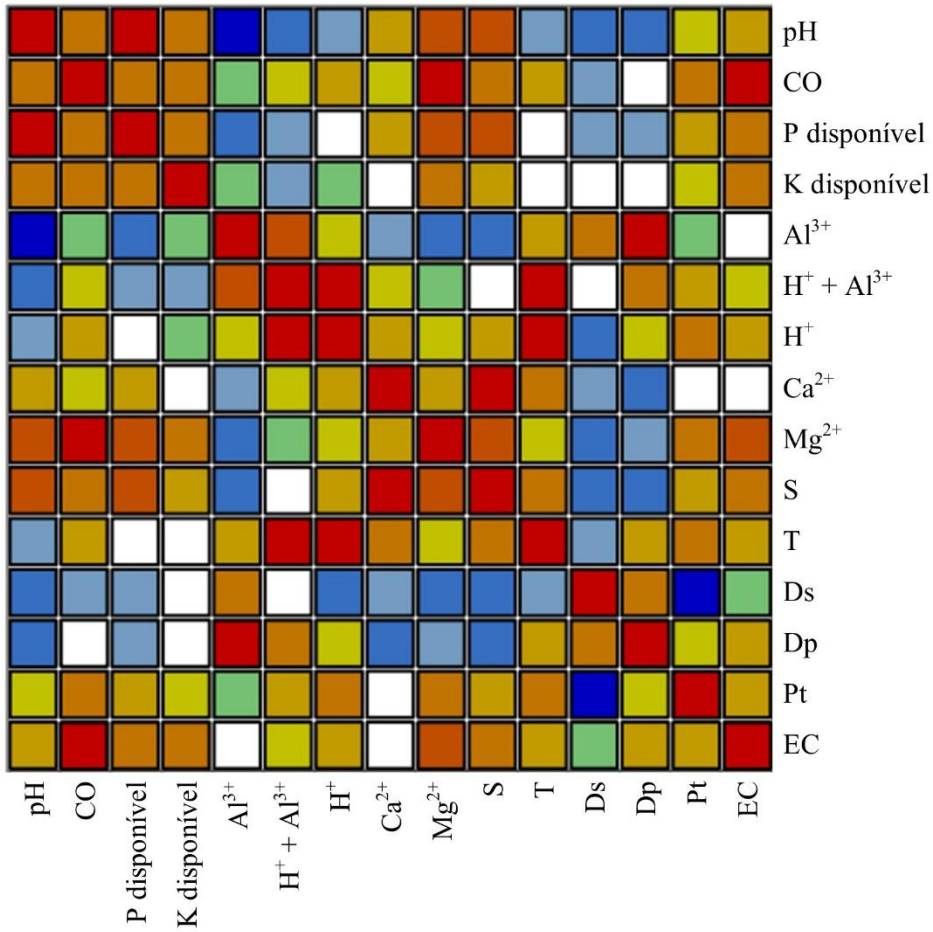

Figura 2 – Mapa de correlação de Pearson com escala azul-vermelha (quente-fria) obtido com as variáveis analisadas em horizontes antrópicos e não antrópicos no Sudoeste da Amazônia.

Obs. A cor azul corresponde a uma correlação próxima de -1 ($p < 0,05$) e a cor vermelha corresponde a uma correlação próxima de 1 ($p < 0,05$).

DISCUSSÃO

CARBONO ORGÂNICO TOTAL E ESTOQUE DE CARBONO

Os teores de carbono orgânico total foram maiores ($p < 0,05$) nos horizontes A antrópico em relação aos horizontes A não antrópicos (Tabela 3). Cunha et al. (2009) observaram resultados similares. Falcão e Borges (2006) mencionaram que as áreas de TPIs apresentam altos valores de matéria orgânica e uma atividade biológica mais intensa, oriundos de ossos de animais e de humanos.

Os horizontes A antrópico de Itapoã, Rolim de Moura e Cabixi apresentaram elevado potencial de estoque de carbono, na camada até 30 cm (Tabelas 2, 3 e 4). Glaser et al. (2000) também observaram em uma profundidade de até 40 cm que em solos de TPI, onde a densidade foi menor que 2,0 o carbono total do solo foi elevado. Esses resultados são importantes porque com uma grande concentração de carbono no solo poderá contribuir para uma melhor penetração das raízes das plantas e melhor absorção de água, consequentemente um melhor desenvolvimento da planta. Vale ressaltar também que o estoque de carbono contribui também para a diminuição de liberação de CO_2 na atmosfera.

O estoque de carbono apresentou correlação significativa positiva com o carbono orgânico total e não teve correlação significativa com a densidade do solo (Figura 2). Isso demonstra a relevância ambiental da fração orgânica dos solos de TPI.

PROPRIEDADES QUÍMICAS

O horizonte A antrópico obteve pH mais elevado (de 5,57 a 6,60) que o horionte A não antrópico (de 4,38 a 5,12). Campos et al. (2012), observaram resultados similares com valores pH, variando de 5,5 a 7,0. Macedo et al. (2019) encontraram maior amplitude de pH, de 4,82 a 7,12. O horizonte A não antrópico de Itapoã e Rolim de Moura já apresentavam menor pH do que as demais áreas, fator esse que contribui para haver diferença entre as TPIs, sendo que o horizonte A antrópico de Cabixi apresentou maior índice que os demais. No entanto, o pH das TPIs de todas as localidades está dentro da faixa ideal para a maioria das culturas (5,5 a 7,0) (LOPES et al., 2004), na profundidade até 30 cm (Tabela 5), o que não ocorre nos horizontes não antrópicos.

Na Tabela 6 observa-se que a maior parte da capacidade de troca de cátions (T) foi composta pela acidez potencial (H+Al) em ambos os tipos de horizontes e em todas as localidades. Portanto, há o potencial de se elevar a fertilidade desses solos por meio de manejo de calagem e adubação. Entretanto, esse manejo deve ser feito com cautela, principalmente nas TPIs para não tornar os solos alcalinos e desbalancear as relações entre os elementos. Mesmo, não alterando a capacidade de troca de cátios, o horizonte A antrópico proporcionou maior soma de bases (1,69 cmolc kg^{-1}) que o horizonte A não antrópico (0,27 cmolc kg^{-1}), revelando assim e em conjunto com outras variáveis, melhores condições de fertilidade para as plantas.

No horizonte A antrópico foram constatados teores elevados de P disponível (de 145,94 a 630,68 mg kg^{-1}). Outros autores também encontraram altos níveis de P disponível, variando de 43 a 898 mg dm^3 (MACEDO et al., 2017; 2019). Alto conteúdo de P disponível é uma característica marcante das TPIs, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018) inseriu em sua última edição a exigência da presença 30 mg dm^{-3} de P disponível para um horizonte ser considerado antrópico. Esses teores elevados contrastam a

realidade da maior parte dos solos amazônicos não antrópicos, como pode ser observado na Tabela 7, com valores variando de 1,14 a 6,75 mg kg^{-1}, e em trabalhos prévios, que apresentaram variação de 0,2 a 3,4 mg kg^{-1} (CAMPOS et al., 2012; MACEDO et al., 2017).

É interessante observar a grande amplitude dos valores de P disponível nos horizontes antrópicos deste (Tabela 7) e de outros estudos (CAMPOS et al., 2012; MACEDO et al., 2017; 2019). Segundo Kämpf et al. (2003) e Kämpf e Kern (2005) os valores elevados de nutrientes estão associados à ocupação humana pré-histórica, haja, vista, que o P pode ser encontrado em restos vegetais (mandioca, açaí, bacaba etc), animais (ossos e excrementos) e resíduos de alimentos. Porém, a disponibilidade está atrelada a outros mecanismos. Apenas incorporar fósforo no solo não garante que esse elemento se torne disponível, devido às reações de fixação (adsorção e precipitação) que ocorrem no solo (BEHERA et al., 2014).

O pH dos solos influencia diretamente as reações de adsorção de fosfato, principal mecanismo de fixação em solos com predomínio de cargas variáveis (NOVAIS et al., 2009). Como nos solos tropicais são comuns, na fração argila, minerais 1:1 (caulinita) e óxidos de ferro e de alumínio, a elevação do pH torna a carga superficial das partículas mais negativa, aumentando a repulsão, e por consequência, diminuindo a adsorção do fosfato (LOPES et al., 2004; NOVAIS et al., 2009). Na Figura 2 é possível observar que o pH obteve correlação significativa positiva com o teor de P disponível.

A presença da matéria orgânica, mais precisamente de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, também diminui as reações de adsorção de fosfato no solo (ANDRADE et al., 2003). O solo pode adsorver ácidos orgânicos com grande energia, ocupando os sítios de adsorção da fase mineral e, ou, formar complexos organometálicos estáveis com Fe e Al, em várias faixas de pH (HAYNES, 1984; SPOSITO, 1989).

Cunha et al. (2009) demonstraram que o horizonte A antrópico, seja em uso agrícola atual, seja sob floresta, possuem elevado teor de grupamentos carboxílicos (COOH) e fenólicos (OH). Segundo Andrade et al. (2003) moléculas orgânicas com maior número de grupos funcionais, como o OH e o COOH, são mais efetivas na competição pelos sítios de adsorção.

O complexo sortivo das TPI's se apresenta bastante variável em trabalhos prévios, com valores variando de 7,10 a 30,02 cmolc kg^{-1} nos primeiros 30 cm de horizontes A antrópico (CAMPOS et al, 2012; MACEDO et al., 2017; 2019). Apenas os resultados da capacidade de troca de cátions do horizonte A antrópico de Itapoã (9,54 cmolc kg^{-1}) esteve dentro deste intervalo observado na literatura, os demais apresentaram menor teor (4,98 a 5,5 cmolc kg^{-1}). Outra diferença observada foi com relação a saturação do complexo sortivo, Nesse estudo a maior parte da capacidade de troca de cátions está ocupada por íons hidrogênio e alumínio (Tabela 6; Figura 2), porém o mais frequente é observar saturação por bases superiores a 50%, podendo chegar a 100% (CAMPOS et al, 2012; MACEDO et al., 2017; 2019). Apenas o horizonte antrópico do Guaporé apresentou maior ($p < 0,05$) capacidade de troca de cátions do que o horizonte não antrópico (Tabela 6). Portanto, se fazem necessários estudos de caracterização da matéria orgânica dos solos deste estudo para elucidar dinâmica da capacidade de troca de cátions.

A disponibilidade de potássio não foi alterada pelo tipo de horizonte na maior parte das localidades. Apenas em Cabixi obteve-se maior teor de potássio disponível em todas as profundidades do horizonte A antrópico em relação ao não antrópico (Tabela 7). Portanto, esse resultado deve estar relacionado a alguma diferença de manejo atual, pois o potássio é um elemento muito móvel no solo (LOPES et al., 2004), e como a presença do horizonte A

antrópico não elevou ($p > 0,05$) a capacidade de troca catiônica (Tabela 6), a capacidade de reter esse elemento a longo prazo também não foi aumentada.

Os valores de cálcio e magnésio trocáveis do horizonte A antrópico foram superiores ($p < 0,05$) ao A não antrópico em todas as localidades (Tabela 8). Santos et al. (2013), analisando as características químicas das TPIs sob diferentes usos, observaram que os teores de Ca e Mg foram maiores nos horizontes antrópicos, porém ressaltaram que nas áreas de pastagens os teores destes dois elementos foram menores, o que pode ter sido influenciado pela variação de tempo e pela densidade (CAMPOS et al., 2010). Na literatura (CAMPOS et al., 2012; CAMPOS et al., 2011; FALCÃO; BORGES, 2006; MACEDO et al., 2017; 2019) é possível encontrar diversos trabalhos com resultados de alto teor de nutrientes nas TPIs, principalmente P e Ca.

PROPRIEDADES FÍSICAS

A densidade de partículas não foi influenciada ($p > 0,05$) por nenhum dos fatores avaliados. Essa é uma propriedade do solo muito estável, que não reflete as condições de estruturação do solo. O fator que influencia mais fortemente a densidade de partículas é a mineralogia das partículas, podendo ser interpretada como a média ponderada das massas específicas das partículas sólidas (FERREIRA, 2010). Não foram realizadas análises mineralógicas neste estudo, mas a condição climática e de relevo similares entres as áreas pode indicar processos pedogenéticos semelhantes.

Como a densidade do solo é uma relação entre massa e volume, é uma propriedade influenciada diretamente pela composição da sua fração sólida. Frequentemente solos mais arenosos e com menor teor de matéria orgânica possuem maior densidade do solo (BRAIDA et al., 2006). A densidade do solo, por sua vez, afeta outras variáveis, como a porosidade do solo e a resistência ao desenvolvimento das raízes (SILVA et al., 2008).

O horizonte a Antrópico apresentou menor densidade do solo e porosidade total mais alta ($p < 0,05$) para todas as localidades, na maior parte das profundidades avaliadas. Como essas variáveis dependem do grau de estruturação do solo, obtiveram correlação positiva significativa (Figura 2). Na localidade de Cabixi não houve diferença significativa entre os tipos de horizontes (Tabela 3). Esse resultado pode estar relacionado ao alto teor de argila dessa localidade. A textura foi classificada como muito argilosa no horizonte A antrópico e argilosa no horizonte A não antrópico (SANTOS et al., 2015). Campos et al. (2012) também constataram valores menores de densidade em horizontes antrópicos.

CONCLUSÕES

1. No horizonte A das Terras Pretas de Índio os teores de pH, fósforo disponível, cálcio e magnésio trocáveis são superiores ao horizonte A das áreas adjacentes.
2. Constata-se elevado teor de carbono orgânico total e alto potencial de estoque de carbono no horizonte antrópico da maioria dos locais avaliados.
3. Melhores condições de densidade do solo e de porosidade total são observadas em horizontes antrópicos em relação aos não antrópicos adjacentes.
4. Verifica-se ainda que há variações nos teores de nutrientes encontrados de uma área para outra, o que confirma que a fertilidade está atrelada aos aspectos ambientais e ao manejo adotado na área.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Rondônia pela concessão de bolsa de iniciação científica e taxa de bancada e a Embrapa Rondônia pelo apoio estrutural e logístico na realização das análises.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v. 27, p. 1003-1011, 2003.

BEHERA, B. C.; SINGDEVSACHAN, S. K.; MISHRA, R. R.; DUTTA, S. K.; THATOI, H. N. Diversity, mechanism and biotechnology of phosphate solubilising microorganism in mangrove - a review. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology,** v. 3, p. 97-110.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M. DA; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio PROCTOR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v. 30, p. 605-614, 2006.

BOIXADERA, J.; ESTEBANC, I.; ALBERT, R. M.; POCH, R. M. Anthropogenic soils from Llanos de Moxos (Bolivia): Soils from pre-Columbian raised fields. **Catena,** v. 172, p. 21-39, 2020.

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

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

CUNHA, T. J.; MADARI, F. 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, p. 85-93, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5 ed., rev e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA**. Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-SPI, 2009, 412 p.

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 hawaí (*Caricapapaya* L.). **Acta Amazonica,** v. 36, p. 401-406, 2006.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. **Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo.** Corumbá: Embrapa Pantanal, 2009. 4 p. (Comunicado Técnico, 69).

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: van Lier, Q. de J. **Física do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazonica,** v. 28, n. 2, p. 101-126, 1998.

HAYNES, R. J. Lime and phosphate in the soil plant system. **Advances Agronomy,** v. 37, p. 249-315, 1984.

GLASER, B.; BALASHOV, E.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. 2000. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. **Organic Geochemistry,** v. 31, p. 669-678, 2000.

GONZÁLES-PÉREZ, J. A.; GONZÁLES-VILA, F. J.; ALMENDROS, G.; KNICKER, H. The effect of fire on soil organic matter – a review. **Environment International,** v. 30, p. 855-870, 2004.

KÄMPF, N. et al. Classification of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. (Ed.) **Amazonian Dark Earths:** Origin, Properties, Management. The Netherlands: Kluwer Academic Publisher, p. 77-102, 2003.

KÄMPF, N.; KERN, D. C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. In: VIDAL – TORRADO, P; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; CARDOSO, E. J. (Org.). **Tópico em ciência do solo.** Viçosa, v. 6, p. 277-320, 2005.

LIMA, H. N. **Gênese, química e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**.

2001. 176 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, R. **Guia de fertilidade do solo.** Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2004. 501 p. (Versão multimídia).

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. **O Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas,** v. 14, n. 1, p. 207-227, 2019.

MACEDO, R. S.; TEIXEIRA, W. G.; CORRÊA, M. M.; MARTINS, G. C.; VIDAL-TORRADO, P. Pedogenetic processes in anthrosols with pretic horizon (Amazonian Dark Earth) in Central Amazon, Brazil. **PLoS ONE,** v. 12, n. 5, e0178038.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F. CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L.

Fertilidade do Solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-550.

QUESADA, C. A.; LLOYD, J.; ANDERSON, L. O.; FYLLAS, N. M.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, C. I. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences,** v. 8, p. 415-1440, 2011.

SANTOS, R. D. dos; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos; SCHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 7. ed. rev. E ampl. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. 102 p.

SILVA, R. F. da; BORGES, C. D.; GARIB, D. M.; MERCANTE, F. M. Atributos físicos e teor de matéria orgânica na camada superficial de um Argissolo Vermelho cultivado com mandioca sob diferentes manejos. **Revista Brasileira Ciência do Solo,** v. 32, p. 2435-2441, 2008.

SOARES, R.; MADDOCK, J. E. L.; CAMPOS, D. V. B.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. A.; SANTELLI, R. E. O Papel das Terras Pretas de Índio no Antropoceno. **Revista Virtual de Química,** v. 10, n. 6, p. 1659-1692, 2018.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils.** New York, Oxford University, 1989. 277 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo.** 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

WOODS, W. I.; MECCANN, J. M. El origen y persistência de las tierras negras de la Amazonía. In: HIRAOKA, M.; MORA, S. (eds.). **Desarrollo Sostentible em la Amazonía**. La Paz: Flutz editora, 2001, p. 23-30.