

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA- INPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA NO TRÓPICO ÚMIDO

**ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO EM TERRA PRETA E TERRA
MULATA NA RESERVA BIOLÓGICA DO RIO TROMBETAS,
ORIXIMINÁ/PA.**

CAUAN FERREIRA ARAÚJO

Manaus, Amazonas
Outubro, 2013

CAUAN FERREIRA ARAÚJO

**ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO EM TERRA PRETA E TERRA
MULATA NA RESERVA BIOLÓGICA DO RIO TROMBETAS,
ORIXIMINÁ/PA.**

Orientador: Dr. Newton Paulo de Souza Falcão

Co-Orientador: Dr. Victor Py-Daniel

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura no Trópico Úmido.

**Manaus, Amazonas
Outubro, 2013**

A663

Araújo, Cauan Ferreira

Estoque de carbono e nitrogênio em terra preta e terra mulata na reserva biológica do Rio Trombetas, Oriximiná/PA / Cauan Ferreira Araújo. --- Manaus: [s. n.], 2014.

x, 90 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) --- INPA, Manaus, 2013.

Orientador : Newton Paulo de Souza Falcão.

Coorientador : Victor Py-Daniel.

Área de concentração : Ciências Biológicas, Agrárias e Humanas.

1. Terra Preta. 2. Estoque de Carbono. 3. Geoestatística. I. Título.

CDD 631.46

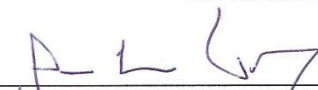
Folha de aprovação

A Banca Julgadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

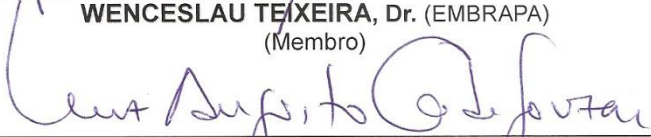
TÍTULO:“ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO EM TERRA
PRETA E TERRA MULATA NA RESERVA BIOLÓGICA DO RIO
TROMBETAS, ORIXIMINÁ/PA”

AUTOR:
CAUAN FERREIRA ARAÚJO

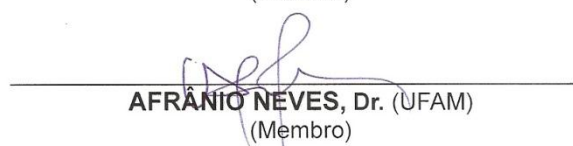
BANCA JULGADORA:



WENCESLAU TEIXEIRA, Dr. (EMBRAPA)
(Membro)



LUIZ AUGUSTO GOMES DE SOUZA, Dr. (INPA)
(Membro)



AFRÂNIO NEVES, Dr. (UFAM)
(Membro)

Manaus, 25 de Novembro de 2013.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1. Terra Preta de Índio: Classificação e formação dos solos com horizonte A antrópico.	2
2.2. Aspectos da Fertilidade em Terra Preta e Terra Mulata.	5
2.3. Geoestatística na predição da espessura de horizontes do solo.....	7
3. REFERÊNCIAS.....	9
Capítulo I.....	18
RESUMO	19
ABSTRACT	20
1.1. INTRODUÇÃO.....	21
1.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
1.2.1. Área de estudo	22
1.2.2. Sondagem dos solos	23
1.2.3. Estatística Descritiva e Análise de Tendência	23
1.2.4. Interpolação por <i>Krigagem</i> ordinária.....	23
1.2.5. Verificação do modelo por Validação cruzada	24
1.2.6. Cálculo dos índices de dependência espacial	25
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
1.4. CONCLUSÕES.....	36
2.5. REFERÊNCIAS.....	36
Capítulo II.....	40
RESUMO	41
ABSTRACT	42
2.1. INTRODUÇÃO.....	43
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	43
2.2.1. Área de estudo	43
2.2.2. Caracterização morfológica dos perfis	44
2.2.3. Predição da espessura do horizonte A antrópico.....	44
2.2.4. Amostragem	45
2.2.5. Preparo das amostras	47
2.2.6. Análises físicas	47
2.2.7. Análises químicas.....	48
2.2.8. Cálculos dos Estoques de C e N.....	49
2.2.9. Análises Estatísticas	50
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
2.3.1. Classificação dos sítios	51
2.3.2. Atributos físicos	51
2.3.3. Carbono, Nitrogênio e C:N.	55
2.3.4. Acidez e Toxidez por Alumínio	60
2.3.5. Macronutrientes e Micronutrientes	64
2.4. CONCLUSÕES.....	71
2.5. REFERÊNCIAS.....	71

LISTA DE TABELAS**Capítulo I**

Tabela 1.1. Estatísticas descritivas básicas das sondagens no horizonte A antrópico.	28
Tabela 1.2. Parâmetros de ajuste para o Sítio 1.	30
Tabela 1.3. Parâmetros de ajuste para o Sítio 2.	32
Tabela 1.4. Parâmetros de ajuste para o Sítio 3.	33
Tabela 1.5. Indicadores obtidos por Validação Cruzada.	34
Tabela 1.6. Índices de Dependência Espacial	35

Capítulo II

Tabela 2.1. . Médias, desvio padrão e teste de médias para frações granulométricas.	54
Tabela 2.2. Médias, desvio padrão e teste de médias para densidade aparente, densidade da partícula e porosidade total.	55
Tabela 2.3. Médias, desvio padrão e teste de médias para teor de carbono, teor de nitrogênio e relação C:N.	56
Tabela 2.4. Médias, desvio padrão e teste de médias para estoque de carbono (t C ha ⁻¹).	57
Tabela 2.5. Médias, desvio padrão e teste de médias para estoque de nitrogênio (t N ha ⁻¹).	58
Tabela 2.6. Médias, desvio padrão e teste de médias para. pH, pH em KCl e ΔpH.	55
Tabela 2.7. Médias, desvio padrão e teste de médias para P disponível (mg Kg ⁻¹).	56

LISTA DE FIGURAS

Introdução Geral

Figura 0.1. Ciclo global do carbono com estoques (em Pg C = 1015g C) nos diferentes compartimentos da Terra e fluxos de carbono (em Pg C ano ⁻¹).	31
Figura 0.2. Aspectos gerais de assentamentos formadores de Terra Preta.	40
Figura 0.3. Manchas de Terra Preta e Terra Mulata, no platô de Belterra.	41
Figura 0.4. Exemplo de semivariograma.	41

Capítulo I

Figura 1.1. Mapa de localização dos sítios estudados.	59
Figura 1.2. Histograma da espessura do horizonte A antrópico.	61
Figura 1.3. Análise de tendência, função de 1 ^a ordem.	62
Figura 1.4. Sítio 1. Semivariogramas: Circular, Esférico, Exponencial e Gaussiano.	62
Figura 1.5. Sítio 2. Semivariogramas: Circular, Esférico, Exponencial e Gaussiano.	62
Figura 1.6. Sítio 3. Semivariogramas: Circular, Esférico, Exponencial e Gaussiano.	62
Figura 1.7. Mapas de predição e desvio padrão da predição, Sítio 1.	62
Figura 1.8. Mapas de predição e desvio padrão da predição, Sítio 2.	62
Figura 1.9. Mapas de predição e desvio padrão da predição, Sítio 3.	62

Capítulo II

Figura 2.1. Localização das parcelas para amostragem de solo.	59
Figura 2.2. Perfis em Terra Mulata, Terra Preta Proto-Hortica, Terra Preta Hortica.	61
Figura 2.3. Análise de regressão para teor de atividade da fração argila em função do teor de carbono total no sítio Terra Preta Hortica.	62
Figura 2.4. Análise de regressão para teor de N total em função do teor de C total no sítio Terra Mulata.	62
Figura 2.5. Médias para estoque de carbono total em 1 metro de solo.	62

Figura 2.6. Médias para estoque de nitrogênio total em 1 metro de solo.	62
Figura 2.7. Al trocável (cmolckg-1) em função da profundidade em (a) Terra Mulata, (b) Terra Preta Proto-Hórtica e (c) Terra Preta Hórtica.	59
Figura 2.8. Al trocável em função do pH.	61
Figura 2.9. Acidez potencial (cmolckg-1) em função da profundidade em (a) Terra Mulata, (b) Terra Preta Proto-Hórtica e (c) Terra Preta Hórtica.	62
Figura 2.10. K em função da profundidade em (a) Terra Mulata, (b) Terra Preta Proto-Hórtica e (c) Terra Preta Hórtica.	62
Figura 2.11. Ca ²⁺ em função da profundidade em (a) Terra Mulata, (b) Terra Preta Proto-Hórtica e (c) Terra Preta Hórtica.	62
Figura 2.12. Mg ²⁺ em função da profundidade em (a) Terra Mulata, (b) Terra Preta Proto-Hórtica e (c) Terra Preta Hórtica.	59
Figura 2.13. Mn em função da profundidade em (a) Terra Mulata, (b) Terra Preta Proto-Hórtica e (c) Terra Preta Hórtica.	61
Figura 2.14. Zn em função da profundidade em (a) Terra Mulata, (b) Terra Preta Proto-Hórtica e (c) Terra Preta Hórtica.	62
Figura 2.15. Boro em função da profundidade em (a) Terra Mulata, (b) Terra Preta Proto-Hórtica e (c) Terra Preta Hórtica.	62
Figura 2.16. Fe em função da profundidade em (a) Terra Mulata, (b) Terra Preta Proto-Hórtica e (c) Terra Preta Hórtica.	62
Figura 2.17. t (cmolckg-1) em função da profundidade em (a) Terra Mulata, (b) Terra Preta Proto-Hórtica e (c) Terra Preta Hórtica.	62
Figura 2.18. T (cmolckg-1) em função da profundidade em (a) Terra Mulata, (b) Terra Preta Proto-Hórtica e (c) Terra Preta Hórtica.	62

RESUMO

A pesquisa aqui resumida objetiva estimar o estoque de carbono e nitrogênio em manchas de Terra Preta de Índio em função de glebas determinadas por categorias de espessura do horizonte A antrópico. Para este fim foram realizados levantamentos em três sítios na Reserva Biológica do rio Trombetas, região da calha-norte, município de Oriximiná/PA. A distribuição espacial da espessura do horizonte A antrópico em cada mancha foi determinada por meio de sondagens, em grade semiregular de 25m x 25m, e interpolação com o método geoestatístico de interpolação *Krigagem* ordinária. A amostragem do solo foi realizada em parcelas de 10m x 10m, com três repetições para cada categoria de espessura do horizonte A antrópico, nos incrementos 0-10cm, 10-20cm, 20-50cm, 50-100cm. A relação Carbono total : Nitrogênio total foi determinada por meio de combustão a seco. A *Krigagem* da espessura do horizonte A antrópico obteve melhores resultados com o modelo teórico exponencial. Demonstrou-se que os três sítios apresentam profundidades máximas semelhantes, indicando possivelmente assentamentos contemporâneos. Os resultados permitem concluir que os sítios possuem estoques de C e N total no primeiro metro de solo superiores aos encontrados nos solos adjacentes imediatos, alcançando médias de 293,37 t C ha⁻¹ e 149,17 t N ha⁻¹, e 219,33 t C ha⁻¹ e 121,30 t N ha⁻¹ em Terra Preta e Terra Mulata, respectivamente. A relação C:N foi significativamente superior nas camadas subsuperficiais de ambos os sítios classificados como Terra Preta, porém não em Terra Mulata. A divisão por glebas tendeu diferenciar a gleba mais espessa em oposição à gleba menos espessa e ao solo adjacente imediato quanto aos estoques de C, N, indicando que ambos os modelos antropogênicos, “lixeira” e “agrícola”, apresentam comportamentos espaciais associados a núcleos de deposição.

Palavras-chave: Terra Preta de Índio; Estoque de Carbono e Nitrogênio; Relação C:N; Geoestatística.

ABSTRACT

The research summarized here aimed to estimate the stock of carbon and nitrogen in patches of *Terra preta* on function plots determined by thickness categories of anthropogenic A horizon. To this end surveys were conducted at three sites in the Biological Reserve of the Rio Trombetas region trough - north city of Oriximiná/PA. The spatial distribution of anthropogenic A horizon thickness in each spot was determined by polls, semiregular grid of 25m x 25m, and geostatistical interpolation method of ordinary kriging interpolation . Soil sampling was conducted in plots of 10m x 10m, with three replicates for each thickness category of anthropogenic A horizon in increments 0 - 10cm, 10 -20cm, 20 - 50cm, 50 - 100cm. The relationship Carbon total: Total nitrogen was determined by dry combustion. The Kriging thickness anthropogenic A horizon obtained better results with the model Theoretical exponential. It has been demonstrated that the three sites have a depth similar, indicating possibly contemporary settlements. The results indicate that the sites have stocks of C and N in the first meter of soil than those found in soils adjacent immediate, reaching averages of 293.37 t C ha⁻¹ and 149.17 t ha⁻¹ N, and 219, 33 t C ha⁻¹ and 121.30 t ha⁻¹ N in *Terra Preta* and *Terra Mulata*, respectively. The C: N ratio was significantly higher in the subsurface layers of both sites classified as *Terra Preta*, *Terra Mulata* but not in. Therefore, it is concluded that the terms *Terra Preta* and *Terra Mulata* keep distinct anthropogenic processes that result in different subsurface conditions. The division of plots tended to differentiate the plot thickened as opposed to the soil less thick and the ground immediately adjacent to stocks as C, N. both models indicating that anthropogenic "bin" and "farm" to show behaviors associated spatial deposition nuclei.

Keywords: *Terra preta*, stock Carbon and Nitrogen, ratio C : N, Geostatistics.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O aumento acelerado das emissões de gases do efeito estufa a partir da segunda metade do século XX, em especial os compostos de carbono, tem sido apontado como grande responsável pelo aquecimento global e pelas mudanças climáticas (IPCC 2007, Hansen *et al.*, 2008). Esses efeitos tiveram repercussão ampla e têm sido vastamente discutidos na sociedade civil, gerando pressão social sobre os órgãos governamentais para a valorização dos serviços ambientais das florestas (Constanza *et al.*, 1997; Fearnside, 2001). Este aspecto dos ecossistemas florestais é considerado uma peça chave em políticas públicas para a manutenção climática global e para o desenvolvimento sustentável das populações locais (Fearnside, 2007). Sob esse contexto, estudos sobre a dinâmica do carbono na floresta Amazônica, sobretudo do carbono no solo (Lehmann, 2007), são essenciais para o estabelecimento de bases técnicas e científicas capazes de balizar o estabelecimento de tais políticas públicas.

Segundo Machado (2005) os quatro principais compartimentos de carbono na Terra são: oceanos, atmosfera, formações geológicas e ecossistemas terrestres. O maior compartimento de carbono na Terra está no oceano (38000 Pg C), seguido das formações geológicas (5000 Pg C). O compartimento de carbono do solo (2500 Pg C) é o maior nos ecossistemas terrestres (aproximadamente 4 vezes o carbono da vegetação e 3,3 vezes o da atmosfera) e é constituído pelo carbono orgânico (1500 Pg C) e mineral (1000 Pg C). O carbono orgânico representa o equilíbrio entre o carbono adicionado ao solo pela vegetação e o perdido para os oceanos via lixiviação como carbono orgânico dissolvido (0,4 Pg C) ou para a atmosfera via atividade microbiana.

Os solos da Amazônia podem ser agrupados segundo sua origem pedológica em duas áreas distintas: a terra firme de formação terciária e a planície de inundação propriamente dita, denominada várzea ou terreno quaternário recente (Alfaia e Souza, 2002). Na terra firme amazônica predominam as classes dos Latossolos e Argissolos; na várzea predominam a classe dos Gleissolos (IBGE, 2001). Segundo Sombroek *et al.* (2002), somente 0,1 a 0,3% da área da bacia amazônica corresponde a solos muito férteis com horizonte A antrópico rico em carbono denominado Terra Preta de Índio.

Na região amazônica predomina a prática da agricultura itinerante de corte e queima, caracterizada como um sistema agroflorestal sequencial temporal, que intercala períodos de cultivo, alternados por etapas de regeneração da cobertura vegetal (Mazoyer e Rodart, 2001). Apesar de sua escassez relativa, ou talvez justamente por esta causa, as terras pretas de índio

mantêm uma posição de destaque nos sistemas de uso do solo pelos agricultores familiares da região (Silva, 2010; Fraser *et al.*, 2011b; Junqueira *et al.*, 2011;). Segundo German (2003), a terra preta de índio costuma ser destinada a cultivos comerciais mais nobres, tais como o milho e a melancia, com maiores valores de venda, porém com maiores exigências de nutrição mineral.

Na região do alto Trombetas, habitam comunidades remanescentes de quilombos, agro-extrativistas tradicionais, organizadas em territórios coletivos sobrepostos ou no entorno de unidades de conservação (Andrade, 2011). Tais populações exercem pressão sobre os recursos disponíveis, ao passo que são constrangidas com limitações ao seu sistema de uso do solo e da biodiversidade, trazendo prejuízos tanto para a gestão das unidades de conservação quanto, e sobretudo, para as comunidades (O'Dwyer, 1993). Tais limitações estão relacionadas a restrições ao acesso a recursos florestais e pesqueiros, sobretudo aos quelônios, item tradicional na economia quilombola do Trombetas (Acevedo, 1998).

Logo, pesquisas que apontem alternativas para geração de renda, por meio da gestão sustentável e eficiente dos recursos do solo e da biodiversidade, são de suma importância para a redução dos conflitos locais. Nesse contexto, Sombroek (2003) destaca a importância de estudos que quantifiquem o estoque de carbono para que se estabeleça uma política ampla para o manejo de áreas de T.P's na região amazônica, através de financiamentos por Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (*Clean Development Mechanism*) do protocolo de Kyoto, ou similares.

Sob esse contexto, o presente estudo se propõe a observar as possíveis correlações entre o estoque de Carbono e a espessura do horizonte A antrópico em terra preta de índio na Reserva Biológica do Rio Trombetas, Oriximiná/PA.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Terra Preta de Índio: Classificação e formação dos solos com horizonte A antrópico.

Na Amazônia ocorrem áreas onde as características originais dos horizontes superficiais do solo foram modificadas pela presença humana pré-colombiana (Sombroek, 1966). Esses solos apresentam cor escura, restos de material arqueológico e altos teores de carbono orgânico, sobretudo de carbono pirogênico, fósforo, cálcio, magnésio, zinco e

manganês contrastando com os Argissolos e Latossolos adjacentes (Falcão *et al.*, 2010). Em função da coloração escura da camada superficial, tais solos são conhecidos por designações como Terra Preta, Terra Preta de Índio, Terra Preta Antropogênica e Terra Preta Arqueológica (Kämpf *et al.*, 2010).

As terras pretas de índio ocorrem tanto em solos da classe dos latossolos quanto argissolos (Lima *et al.*, 2002). O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos se refere a tais solos apenas no 4º nível de classificação, indicando a presença de horizonte A antrópico, sem maiores detalhamentos quanto a seus processos formadores específicos (EMBRAPA, 2009).

Para possibilitar um estudo mais sofisticado de tais solos Kämpf *et al.*, (2010) propõem a Legenda de Classificação Arqueopedológica (LCA) com o objetivo de promover a interdisciplinaridade das várias áreas de pesquisa engajadas. A LCA compreende quatro níveis categóricos: o primeiro nível tem apenas um grupo de solo baseado no horizonte de referência (A e Ab), os Arqueoantossolos; o segundo nível identifica as classes segundo atributos do solo relacionados a processos antrópicos, antropogênicos e/ou antropogeomórficos; no terceiro nível são identificados atributos relacionados com o potencial agrícola, intensidade e tipo de uso, densidade populacional, expressos em cor, textura, espessura, fertilidade química, acreção e degradação física (Kämpf *et al.*, 2010).

Lima (2002) associa a ocorrência de T.P's a proximidades de áreas de várzea por dois fatores: as cerâmicas encontradas em T.P's. geralmente apresentam argila 2:1, inexistente na terra-firme; Zn e Mn também encontrados em quantidades semelhantes. A sua teoria populacional diz que as várzeas podem prover os nutrientes suficientes porem não área de habitação fixa; assim as “beiradas” da várzea são localizações privilegiadas por permitirem o acesso aos recursos e ao mesmo tempo a sedentarização, conforme indicado na Figura 2.

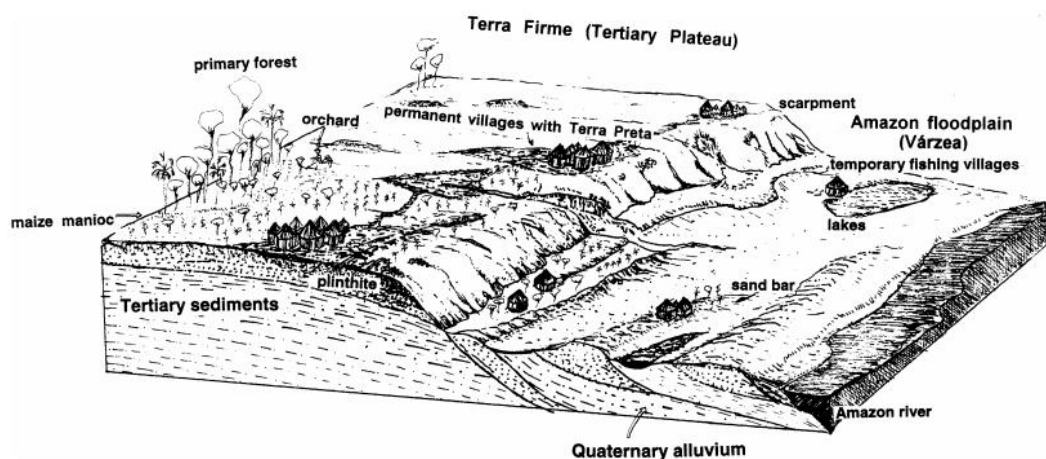


Figura 2. Aspectos gerais de assentamentos formadores de Terra Preta. Fonte: Lima (2002).

Segundo (Sombroek, 1966) e Woods (2010), dentre essas variações podemos destacar a Terra Preta e a Terra Mulata, como resultantes de dois processos formadores espacialmente distintos, correspondendo aos locais de habitação e cultivo agrícola, respectivamente, conforme indicado na Figura 3. Fraser *et al.* (2011a) propõem a adoção dos termos Terra Preta e Terra Mulata como dois pontos em um *continuum* de fertilidade.

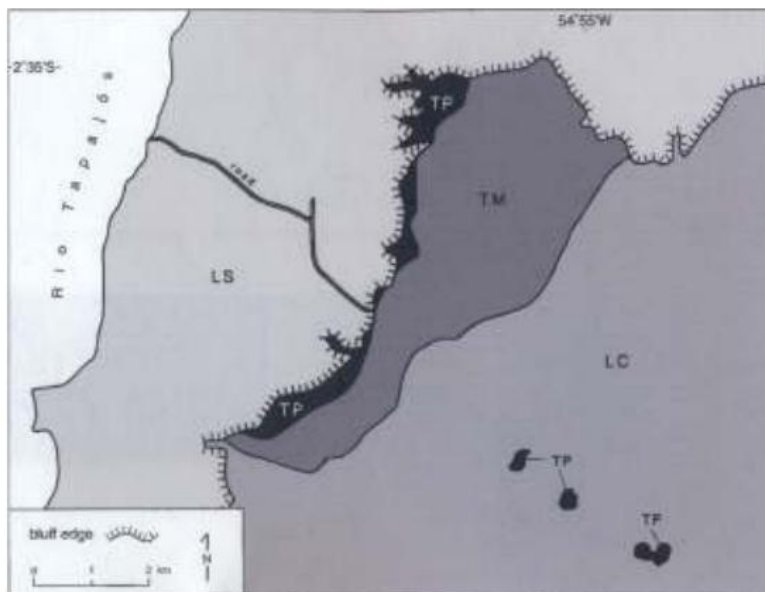


Figura 3. Manchas de Terra Preta e Terra Mulata, no platô de Belterra. Fonte: Sombroek (1966).

Segundo Costa (2004), no período tardio pré-contato existiam aldeamentos extensos, cujos povos apresentavam um modo de vida sedentário, baseado no extrativismo vegetal e animal, e na agricultura. Este período representa a fase final da evolução dos caçadores-coletores em ceramistas.

A bacia do Trombetas foi intensamente povoada por populações indígenas no período pré-colombiano, segundo Guapindaia (2008) os assentamentos que deram origem as manchas de T.Ps na região do alto Trombetas datam de 2300 A.P. na fase Pocó a 550 AP na fase Konduri. Segundo Scoles (2011), isso se evidencia com a associação clara existente entre as florestas antrópicas de castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*) e os sítios de Terra Preta de Índio, abundantes na região (Kern e Kämpf, 1989).

As manchas de T.P's na região ocorrem no entorno de rios, igarapés e lagos, e em serras de 40 a 50 metros que acompanham o curso inferior do rio Trombetas (Barbosa de Faria, 1946; Hilbert, 1955; Hilbert e Hilbert, 1980; Guapindaia *et al.* 2001; Guapindaia e Lopes 2005; Guapindaia *et al.* 2007). Em levantamentos realizados próximo à localidade de Cachoeira Porteira (Kern, 1988; Kern e Kämpf, 1989; Costa *et al.*, 2004) foram caracterizadas

manchas de T.P's com formas circulares medindo de 1 a 8ha, próximas umas às outras e com distribuição regular. Posteriormente, Meddens (2006) utilizando informações de Kern *et al.* (2003) localizou manchas com formato alongado próximo a Porto Trombetas por meio de levantamento por sensoriamento remoto.

2.2. Aspectos da Fertilidade em Terra Preta e Terra Mulata.

Segundo Teixeira *et al.* (2010), as terras pretas de índio possuem elevada resiliência em relação à degradação química e física, segundo resultados de experimento de uso intensivo com mecanização tratorizada realizado por 30 anos pela Embrapa Amazônia Ocidental. Barrow (2012) afirma que os teores elevados de carbono pirogênico acumulados pelos processos antropogênicos são a chave para a diferenciação das T.P's conferindo propriedades importantes para a manutenção da fertilidade e do potencial agrônômico de tais solos.

Conforme observado por Teixeira *et al.* (2010), os horizontes antrópicos apresentam uma textura mais arenosa que os solos de origem, devido à formação de partículas organominerais bastante estáveis na fração areia pela ação do fogo sobre a biomassa. Laird *et al.* (2010b) destaca que os solos ricos em carvão apresentam menor densidade e maior porosidade que os solos adjacentes. Segundo Neves Jr. (2008) as T.P's exibem condições de aeração, porosidade e condutividade hidráulica adequada; no entanto apresenta elevada coesão quando seca podendo diminuir o crescimento das raízes devida a elevada resistência mecânica, mesmo dentro da faixa de água disponível. Logo, apesar de terem características físicas adequadas ao uso agrônômico não apresentam superioridade significativa quando comparadas a solos adjacentes.

Yuan *et al.* (2011) e Laird *et al.* (2010b) observaram em seus ensaios reduções significativas na acidez trocável, portanto uma elevação no pH, a partir da adição de carvão a diferentes classes de solo. Tais informações experimentais corroboram com amostras em sítios de terra preta de índio (Falcão *et al.*, 2010), caracterizando estes como de baixa acidez trocável e elevada capacidade de troca de cátions. Liang *et al.* (2006) relaciona o aumento da capacidade de troca de cátions a duas propriedades inerentes ao carvão: elevada densidade de carga por unidade de área superficial; elevada superfície de adsorção.

Solos antropogênicos são ricos em N, no entanto o alto conteúdo de C, elevando a razão C : N, colabora para manter o N imobilizado (Lehmann *et al.*, 2003). Porém, segundo Knowles *et al.* (2011) a incorporação de carbono resulta em maior retenção de N no solo e maior absorção de N em médio prazo pelas plantas, mantendo-o na zona das raízes. Spokas *et*

al. (2012) afirmam que a adsorção de N amoniacal por carvão é estável por pelo menos 12 dias em condições de laboratório, e confirmam em experimento de campo que esse processo é reversível, estando o N amoniacal parcialmente disponível para as plantas. Laird *et al.* (2010) em um ensaio com colunas de solo verificou que o NO₃-N foi menos lixiviado na presença de carvão. Prendergast-Miller *et al.* (2011) encontrou evidências que as alterações físicas no solo causadas pelo carvão, com efeitos no fluxo de massas e retenção de água, favorecem o acúmulo de NO₃- na rizosfera reduzindo os processos de lixiviação e desnitrificação. Steiner *et al.* (2008) corrobora com tais resultados, porém indica que o processo de retenção de N pelo C no solo carece de maiores estudos para mensurar a relevância da imobilização, da redução da lixiviação e das perdas por gases.

Lima *et al.* (2010), analisando as frações de solo com método de microscopia digital e microsonda EDS, observa que o fósforo presente em grande quantidade nas T.P's. tem como fonte primária microfragmentos de apatita biogênica constituída de ossos e espinhas de peixe. Segundo Sato *et al.* (2010), formas secundárias mais complexas de CA-P biogênico, adsorvidos nas formas P-Al e P-Fe são provenientes da intensa pedoturbação e se estendem em profundidade como demonstram os teores elevados encontrados nos horizontes Bw em T.Ps. Segundo Falcão *et al.* (2010) o Ca e o Mg são os cátions básicos que mais contribuem para a soma de bases nas T.P's. apesar dos teores de K também se apresentarem adequados para o uso agrícola, este é muito baixo quando comparado ao Ca e Mg o que pode afetar a absorção de K prejudicando o balanço nutricional das culturas cultivadas em T.P's.

Segundo Liang *et al.* (2010), a presença de carbono pirogênico leva a incorporação mais rápida da matéria orgânica adicionada a agregados e a frações organo-minerais, devido a ação microbiana, embora o mecanismo para tal ainda não esteja claro. Zimmerman *et al.* (2011) sugere que a matéria orgânica é progressivamente adsorvida na superfície e nos poros das partículas de carbono pirogênico, onde fica protegida da degradação. Moreira (2007) destaca que a ação antrópica pré-colombiana nos solos da Amazônia ocasionou aumento do conteúdo de ácidos húmicos e humina e redução dos ácidos fúlvicos, com consequente melhoria na qualidade da matéria orgânica do solo.

De acordo com Knicker (2007), a quantidade de carbono pirogênico nas camadas superiores do solo pode ser diminuída por carboxilação, o que aumenta a solubilidade em água e, portanto, de lixiviação para horizontes mais profundos. O aumento resultante na polaridade pode também, no entanto, promover a adsorção à fase mineral, em particular para os óxidos de metais, o que seria uma influência estabilizadora. O autor sugere ainda que tal

mecanismo possa ser o responsável pela alta ocorrência de carbono orgânico nos horizontes profundos das terras pretas de índio.

2.3. Geoestatística na predição da espessura de horizontes do solo

O termo geoestatística é empregado para caracterizar o estudo estatístico de um fenômeno natural com localização conhecida. A diferença básica entre a abordagem estatística convencional e a abordagem geoestatística, consiste em que, a primeira requer independência entre amostras, enquanto a segunda requer amostras correlacionadas espacialmente (Sturaro, 1993), também denominadas “variáveis regionalizadas” (Journel e Huijbregts, 1978). Por tanto, a geoestatística tem por objetivo a caracterização espacial de uma variável regionalizada de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espaciais, com determinação das incertezas associadas. Segundo Olea (1975) a hipótese da estacionariedade intrínseca é o único requisito para a predição geoestatística. Tal hipótese considera que a variância dos incrementos ocorrem independentemente da localização no espaço amostral, sendo apenas função da distância entre as amostras.

A inferência da continuidade espacial de uma variável regionalizada, representada por meio do semivariograma, pode ser feita com valores amostrais tendo como base a estatística de dois pontos (Yamamoto e Landin, 2013). Segundo Guerra (1988), podem ocorrer três tipos de semivariograma: o observado ou experimental, neste caso, obtidos a partir de sondagens; o verdadeiro, ou fenômeno real, não observável em sua plenitude; e o teórico, que deve ser ajustado ao modelo experimental e será a referência sobre a qual são construídos os mapas de predição. Na figura 4 é apresentado um modelo de semivariograma. O efeito pepita (C_0) corresponde à variabilidade a distância zero, associada à erros inerentes aos processos de inferência ou ao grau de aleatoriedade da variável estudada. A contribuição (C_1) corresponde à estrutura de dependência do fenômeno, indicando a intensidade do efeito. O alcance (a) corresponde a distância em que existe dependência entre amostras, alcançando o patamar ($C_0 + C_1$), a partir da qual podemos considerar duas amostras como independentes.

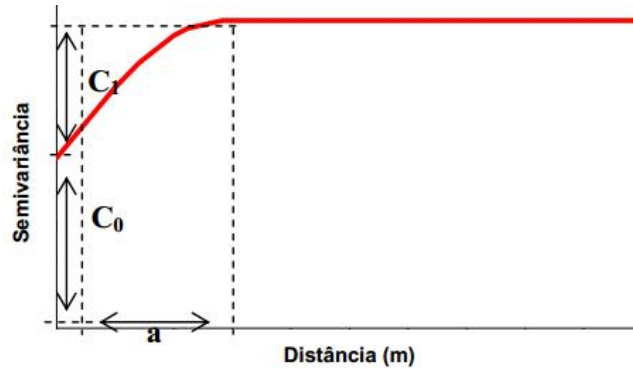


Figura 4. Exemplo de semivariograma.

O termo *Krigagem* foi usado primeiramente por Matheron (1963), em homenagem ao engenheiro de minas sul-africano Krige (1951), que primeiro formulou e implementou essa forma de interpolação. Segundo Yamamoto e Landin (2013), a *Krigagem* ordinária é um método local de estimativa e, dessa forma, a estimativa em um ponto não amostrado resulta da combinação linear dos valores encontrados na vizinhança próxima em função da variação espacial representada pelo semivariograma. Pires (2010) afirma que a *Krigagem* é o melhor interpolador linear não tendencioso, ou seja, a média da diferença entre os valores preditos e verdadeiros é nula e as previsões produzidas tem variância mínima.

O estimador da *Krigagem* ordinária está representado pela equação a seguir (Reis, 2013):

$$\hat{Z}_{(t_0)} = \sum_{i=1}^n [\lambda_i \times Z_{(t_i)}]$$

A geoestatística vem sendo aplicada a diversas áreas da ciência, e em especial a ciência do solo (Goovaerts, 1999). Diversos autores (Knotters, 1995; Albuquerque *et al.*, 1996; Bourennane, 2000; Vanwallegem, 2010) utilizaram a *Krigagem* para construir mapas preditivos da espessura dos horizontes do solo.

3. REFERÊNCIAS

- Acevedo, R.; Castro, E. 1998. *Negros do Trombetas: Guardiães de Matas e Rios*. 2. ed. Belém: Cejup/UFGPA-NAEA. 278p.
- Albuquerque, J.A.; Reinert, D.J.; Fiorin, J.E. Variabilidade de solo e planta em podzólico vermelho-amarelo. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 20:151-157, 1996.
- Alfaia, S.S.; Souza, L.A.G. de. 2002. Perspectivas do uso e manejo dos solos da Amazônia. In: Araújo, Q.R.de. (Org.). *500 anos de uso do solo no Brasil*. Editora da UESC. Ilhéus. p.311-327.
- Andrade, L.M.M. 2011. Terras Quilombolas em Oriximiná: pressões e ameaças. 1. ed. São Paulo: Comissão Pró-Índio de São Paulo. p.13-17.
- Barbosa de Faria, J. 1946. A cerâmica da tribo Uaboí dos rios Trombetas e Jamundá. Contribuição para o estudo da arqueologia pré-histórica do Baixo Amazonas. Ministério da Agricultura, CNPI. Publicação nº 89. Rio de Janeiro, Imprensa Nacional.
- Barrow, C.J. Biochar: Potential for countering land degradation and for improving agriculture. *Applied Geography* 34 (2012) 21-28.
- Bourennane, H.; King, D.; Couturier, A. Comparison of kriging with external drift and simple linear regression for predicting soil horizon thickness with different sample densities. *Geoderma* 97 (2000) 255-271.
- Constanza, R., d'Arge, de Groot, R., Stephen, F., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruello, J., Raskin, R.G., Suttonkk, P., van den Belt, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(1997): 253-260.

- Costa, M.L.; Kern, D.C.; Pinto, A.H.E.; Souza, J.R.T. The ceramic artifacts in archaeological black earth (terra preta) from lower Amazon region, Brazil: Mineralogy. In: *Acta Amazônica*, vol. 34 (2004): 165-178.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2009. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 412p.
- Falcão, N.P.S.; Moreira, A.; Comenford, N.B. 2010. A fertilidade dos solos de terra preta de índio da Amazônia Central. In: Teixeira, W.G. (org.). *As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas*. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- Fearnside, P.M. 2007. Serviços ambientais como base para o uso sustentável de florestas tropicais na Amazônia brasileira. In: Buenafuente, S. (ed.) *Amazônia: riquezas naturais e sustentabilidade sócio-ambiental*. Editora da Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, Roraima.
- Fearnside, P.M. 2001. Salvar florestas tropicais como uma medida de mitigação do efeito estufa: o assunto que mais divide o movimento ambientalista. PP.193-215. In: de Macedo, J.L.V., Wandelli, E.V; da Silva Junior, J.P. (eds) *Palestras, III Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais*. Documentos 17, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)-Centro de Pesquisas Agroflorestais da Amazônia (CPAA), Manaus, Amazonas. 248 pp.
- Fraser, J.; Teixeira, W.G.; Falcão, N.P.S.; Woods, W.; Lehmann, J.; Junqueira, A.B. 2011. Anthropogenic soils in the Central Amazon: from categories to a continuum. *Area* 43.3 (2011a): 264-273.
- Fraser, J.A.; Junqueira, A.B.; Clement, C.R. Homegardens on Amazonian Dark Earth, non-anthropogenic upland, and floodplain soils along the Brazilian middle Madeira river exhibit diverging agrobiodiversity. *Economic Botany*, 65, 1 (2011b): 1-12.

- German, L.A. 2003. Historical contingencies in the coevolution of environment and livelihood: contributions to the debate on Amazonian Black Earth. *Geoderma* 111 (2003): 307-331.
- Goovaerts, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma* 89 (1999) 1-45.
- Guapindaia, V. 2008. Além da margem do rio – a ocupação Konduri e Pocó na região do Porto Trombetas, PA. Tese de Doutorado. São Paulo. USP : Museu de Arqueologia e Etnologia. 203p.
- Guapindaia, V.; Magalhães, M.; Lopes, P. 2007. Relatório de Prospecção na Estrada Saracá-Oeste, Mina Saracá V. (Manusc. Inéd. 12 f). Belém. MPEG/MRN/FIDESA.
- Guapindaia, V.; Lopes, D. 2005. Relatório da Sétima e da Oitava Etapas de Campo: Escavações nos Sítios PA-OR-63: Boa Vista e PA-OR-70: Horta. (Manusc. Inéd. 46 f). Belém, MPEG/MRN/FADESP.
- Guapindaia, V.; Pereira, E.; Silveira, M.; Lopes, D. 2001. Relatório de Prospecção e Salvamento Arqueológico nos Platôs Saracá, Papagaio e Periquito e na Correia Transportadora Saracá/Aviso/Almeidas. (Manusc. Inéd. 61f). Belém, MPEG/MRN/FADESP.
- Guerra, P.A.G. Geoestatística operacional. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 1988, 145p.
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., Pagani, M., Raymo, M., Royer, D.L., Zachos, J.C. Target atmospheric CO₂: where should humanity aim? *Open Atmos Sci J.*, 2 (2008): 217-31.

- Hilbert, P.P. 1955. A cerâmica arqueológica da região de Oriximiná. In: Anais do XXXI Congresso Internacional de Americanistas. São Paulo, Departamento de Historia de América, Universidad de Sevilla.
- Hilbert, P.P.; Hilbert, K. 1980. Resultados preliminares da pesquisa arqueológica nos rios Nhamundá e Trombetas, Baixo Amazonas. Belém, Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi, (Nova série Antropologia).
- IBGE. 2001. Mapa de solos do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2001. 1 mapa, color. Escala 1:5.0.0. Disponível em: <<http://w.ibge.gov.br>>. Acesso em: 18 mai. 2012.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007. Synthesis Report. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf. Acessado em 20 de março de 2012.
- Journel, A.G. & Huijbregts, C.J. Mining geostatistics. London: Academic Press, 1978. 600p.
- Junqueira, A.B.; Shepard Jr, G.H.; Clement, C.R.; Secondary forests Anthropogenic soils of the middle Madeira River: Valuation, Local Knowledge, and Landscape Domestication in Brazilian Amazonia. *Economic Botany*, 65 (2011) : 85-99.
- Kämpf, N.; Woods, W.I.; Kern, D.C.; Cunha, T.J. 2010. Classificação de Terras Pretas de Índio e Outros Solos Antrópicos Antigos. In: Teixeira, W.G. (org.). *As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas*. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- Kern D.C.; D'Aquino, G.; Rodrigues, T.E.; Franzão, F.J.L.; Sombroek, W.; Myers T.P.; Neves, E.G. 2003. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: Lehman et al (eds), *Amazonian Dark Earths: Origin, properties, management*. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands: 51-75
- Kern, D., Kämpf, N. O efeito de antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 13 (1989): 219-225.

- Kern, D. Caracterização pedológica de solos com terra arqueológica na região de Oriximiná. Porto Alegre. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 242p, 1988.
- Knicker, H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry* 85(2007): 91-118.
- Knotters, M.; Brus, D.J.; Oude Voshaar, J.H. A comparison of kriging, co-kriging and kriging combinend with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations. *Geoderma* 67 (1995) 227-246.
- Knowles, O.A.; Robinson, B.H.; Contangelo, A.; Clucas, L. 2011. Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids. *Science of the Total Environment* 409 (2011): 3206-3210.
- Krige, D.G.A. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the witwatersrand. *Journal of South African Institution of Mining and Metallurgy*, Johannesburg, v. 52, p.119-139, 1951.
- Laird, D.A.; Fleming, P.; Wang, B.; Horton, R.; Karlen, D. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158 (2010): 436-442.
- Laird, D.A.; Fleming, P.; Davis, D.D.; Horton, R.; Wang, B.; Karlen, D.L. 2010b. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158 (2010): 443-449.
- Lehmann, J. A handful of carbon. *Nature*, 447(2007): 143-144.
- Lehmann, J.; Silva Jr, J.P.; Steiner, C.; Nehls, T.; Zech, W.; Glaser, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249 (2003): 343-357.

- Liang, B.; Lehmann, J.; Sohi, S.P.; Thies, J.E.; O'Neill, B.; Trujillo, L.; Gaunt, J.; Solomon, D.; Grossman, J.; Neves, E.G.; Luizão, F.J. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic Geochemistry* 41 (2010): 206-213.
- Liang, B.; Lehmann, J.; Solomon, D.; Kinyangi, J.; Grossman, J.; O'Neill, B.; Skjemstad, J.O.; Thies, J.; Luizão, F.J.; Petersen, J.; Neves, E.G. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70 (2006): 1719-1730.
- Lima, H. N.; Schaefer, C.E.G.R.; Kämpf, N.; Costa, M. L.; Souza, K.W. 2010. Métodos de Caracterização Química de Amostras de Horizontes Antrópicos das Terras Pretas de Índio. In: Teixeira, W.G. (org.). *As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas*. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- Lima, H.N.; Schaefer, C.E.R; Mello, J.W.V.; Gilkes, R.J.; Ker, J.C. Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. *Geoderma* 110 (2002): 1-17.
- Machado, P.L.O.A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Quim. Nova*, Vol. 28, No. 2. (2005): 329-334.
- Matheron, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, v. 58, p.1246-1266, 1963.
- Mazoyer, M.; Roudart, L. 2001. História das agriculturas do mundo: do neolítico à crise contemporânea. Lisboa: Instituto Piaget. 520 p.
- Meddens, A.J.H. 2006. Possibilities of mapping Amazonian Dark Earths using remote sensing techniques. *Capita Selecta GIS / Remote sensing - Wageningen University*.
- Moreira, A. Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia ocidental. *Bragantia* 66,2 (2007): 307-315.

- Neves Jr, A.F. 2008. Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) na Amazônia Central. Tese de Doutorado : ESALQ / USP.
- Olea, R.A. Optimum mapping techniques using regionalized variable theory. Lawrence, university of Kansas, 1975. 137p. (Series on Spatial Analysis, 2)
- O'Dwyer, E.C. "Remanescentes de Quilombos na Fronteira Amazônica: A etnicidade como instrumento de luta pela terra." Departamento de Antropologia, ICHF-UFF. Rio de Janeiro, 1993.
- Prendergast-Miller, M.T.; Duvall, M.; Sohi, S.P. 2011. Localisation of nitrate in the rhizosphere of biochar-amended soils. *Soil Biology & Biochemistry* 43 (2011) : 2243: 2246.
- Pires, C.A.F. Geoestatística Aplicada. Instituto de Geociências – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010. 154p.
- Reis, C.P. Simulação de fatores que afetam as predições obtidas por Krigagem Ordinária. Universidade Federal de Viçosa - Dissertação (Mestrado), Viçosa, MG, 2013.
- Sato, S.; Neves, E.G.; Solomon, D.; Liang, B.; Lehmann, J. Biogenic calcium phosphate transformation in soils over millennial time scales. *J Soils Sediments* (2009) 9: 194-205.
- Scoles, Ricardo. Do rio Madeira ao rio Trombetas: novas evidências ecológicas e históricas da origem antrópica dos castanhais amazônicos. *Novos Cadernos NAEA*. v. 14, n.2, (2011) p.265-282.
- Silva, F.A. 2010. As atividades econômicas das populações indígenas amazônicas e a formação das terras pretas: O exemplo dos Asurini do Xingu. In: Teixeira, W.G. (org.). *As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas*. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.

- Sombroek, W.G.; Ruivo, M.L.; Fearnside, P.M.; Glaser, B.; Lehmann, J. Amazonian Dark Earths as carbon stores and sinks. In: Lehmann, J.; Kern, D.C.; Glaser, B.; Woods, W.I. (Eds.). Amazonian Dark Earths: origin, properties, and management. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. p.125-139.
- Sombroek, W.; Kern, D.; Rodrigues, T.; Cravo, M.S.; Jarbas, T.C.; Woods, W.; Glaser, B. Terra Preta and Terra Mulata: pre-Columbian Amazon kitchen middens and agricultural fields, their sustainability and their replication. 17th World Congress Soil Science, Thailand, 2002. Symposium no. 18, Paper no. 1.935: 14-21.
- Sombroek, W.G. 1966. Amazon Soils: A Reconnaissance of The Soils of the Brazilian Amazon Valley. Pudoc, Wageningen. 292p.
- Spokas, K.A.; Novak, J.M.; Venterea, R.T. 2012. Biochar's role as an alternative N-fertilizer: ammonia capture. Plant Soil 350 (2012): 35-42.
- Steiner, C.; Glaser, B.; Teixeira, W.G.; Lehmann, J.; Blum, W.E.H.; Zech, W. 2008. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. J. Plant. Nutr. Soil. Sci. 171 (2008): 893-899.
- Sturaro, J.R. 1993. Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
- Teixeira, W.G.; Martins, G.C.; Macedo, R.S.; Neves Jr, A.F.; Moreira, A.; Benites, V.M.; Steiner, C. 2010. As propriedades físicas e hídricas dos horizontes antrópicos das Terras Pretas de Índio na Amazônia Central. In: Teixeira, W.G. (org.). As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- Vanwalleghem, T.; Poesen, J.; McBratney, A.; Deckers, J. Spatial variability of soil horizon depth in natural loess-derived soils. Geoderma 157 (2010) 37-45.

- Woods, W. 2010. Os solos e as ciências humanas: interpretação do passado. In: Teixeira, W.G. (org.). As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- Yamamoto, J.K.; Landin, P.M.B. 2013. Geoestatística: conceitos e aplicações. São Paulo : Oficina de Textos, 214p.
- Yuan, J.H.; Xu, R.K.; Wang, N.; Li, J.Y. 2011. Amendment of acid soils with crop residues and biochars. *Pedosphere* 21,3 (2011): 302-308.
- Zimmerman, A.R.; Gao, B.; Ahn, M.Y.; Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology & Biochemistry* 43 (2011) 1169-1179.

Capítulo I

Predição Geoestatística da Espessura do Horizonte A Antrópico em Terra Preta e Terra Mulata na Reserva Biológica do Rio Trombetas, Oriximiná- PA.

Predição Geoestatística da Espessura do Horizonte A Antrópico em Terra Preta e Terra Mulata na Reserva Biológica do Rio Trombetas, Oriximiná- PA.

Cauan Ferreira Araújo¹

¹ Pós-graduando em Agricultura no Trópico Úmido, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Av. André Araújo, 2936, Aleixo. 69060-001, Manaus, AM.
cauanaraujo@yahoo.com.br

RESUMO

A pesquisa aqui resumida objetiva estimar a espessura do horizonte A antrópico em manchas de Terra Preta de Índio. Para este fim foram realizados levantamentos em três sítios na Reserva Biológica do rio Trombetas, região da calha-norte, município de Oriximiná/PA. A distribuição espacial da espessura do horizonte A antrópico em cada mancha foi determinada por meio de sondagens com trado holandês, em grade semirregular de 25m x 25m, e interpolação com o método geoestatístico de interpolação *Krigagem* ordinária. Os modelos teóricos testados para ajuste ao semivariograma experimental foram: circular, esférico, exponencial e gaussiano. O semivariograma para a *Krigagem* da espessura do horizonte A antrópico teve o parâmetro pepita ajustado “a sentimento”, e os parâmetros patamar e alcance ajustados por mínimos quadrados ponderados. A verificação do melhor ajuste foi realizada através da técnica da validação cruzada, e adicionalmente foram observados os índices de dependência espacial. Os resultados permitem concluir que o modelo teórico exponencial obteve a predição com menor enviesamento e maior precisão na determinação do desvio padrão, e adicionalmente maiores índices de dependência espacial, sendo este o mais recomendado para o estabelecimento de glebas em função da espessura do horizonte A antrópico nos sítios estudados. Foram produzidos mapas preditivos e de desvio padrão da predição para os quatro modelos testados.

Palavras-chave: Terra Preta de Índio; Geoestatística; *Krigagem* ordinária de atributos do solo.

Prediction of Geostatistics thickness Horizon The Anthropogenic in *Terra Preta* and *Terra Mulata* in the Biological Reserve of Rio Trombetas, Oriximiná/PA.

ABSTRACT

The research summarized here aims to estimate the thickness of the anthropogenic A horizon in patches of *Terra preta*. To this end surveys were conducted at three sites in the Biological Reserve of the Rio Trombetas region trough - north city of Oriximiná/PA. The spatial distribution of anthropogenic A horizon thickness in each spot was determined through surveys of Dutch auger, semirregular grid of 25m x 25m, and geostatistical interpolation method of ordinary kriging interpolation. Theoretical models tested to fit the experimental semivariogram were: circular, spherical, exponential and Gaussian. The semivariogram for Kriging thickness anthropogenic A horizon had the nugget parameter set "the feeling" and the level and range parameters adjusted weighted least squares. Verification of best fit was performed using the technique of cross-validation, and additionally were observed indices of spatial dependence. The results indicate that the exponential model Theoretical prediction obtained with less bias and greater precision in determining the standard deviation, plus higher levels of spatial dependence, which is the most recommended for the establishment of plots depending on the thickness of the anthropogenic A horizon studied sites. Predictive maps were produced and standard deviation of the prediction for the four models tested.

Keywords: *Terra preta*, Geostatistics, ordinary kriging of soil properties.

1.1. INTRODUÇÃO

Na Amazônia ocorrem áreas onde as características originais dos horizontes superficiais do solo foram modificadas pela presença humana pré-colombiana (Sombroek, 1966), formando horizontes A antrópicos. Em função da coloração escura da camada superficial, tais solos são conhecidos por designações como Terra Preta, Terra Preta de Índio, Terra Preta Antropogênica e Terra Preta Arqueológica (Kämpf *et al.*, 2009). Esses solos apresentam restos de material arqueológico e altos teores de carbono orgânico, sobretudo de carbono pirogênico, fósforo, cálcio, magnésio, zinco e manganês contrastando com os Argissolos e Latossolos adjacentes (Falcão *et al.*, 2009).

Lima (2002) associa a ocorrência de Terras Pretas a proximidades de áreas de várzea, pois estas podem prover os nutrientes suficientes porém não área de habitação fixa. Deste modo, as “beiradas” da várzea são localizações privilegiadas por permitirem o acesso aos recursos e ao mesmo tempo a sedentarização. Segundo Kern *et al.* (2003), o horizonte A antrópico pode variar de 10 a 200cm de espessura, porém a grande maioria dos sítios arqueológicos em Terra Preta apresenta de 30 a 60cm de espessura. Essas variações estão diretamente relacionadas com o padrão de assentamento humano pré-histórico, visto que Terras Pretas profundas pressupõem ocupação por longos períodos de tempo.

No estudo ao qual este capítulo está inserido, as variações na espessura do horizonte A antrópico são de suma importância para o estabelecimento das glebas para amostragem do solo. Portanto, se faz necessário o uso de um método para estimar, ou prever, de forma eficaz tal propriedade.

O termo *Krigagem* foi usado primeiramente por Matheron (1965), em homenagem ao engenheiro de minas sul-africano Krige (1951), que primeiro formulou e implementou essa técnica de interpolação. Pires (2010) afirma que a *Krigagem* é o melhor interpolador linear não tendencioso, ou seja, a média da diferença entre os valores preditos e verdadeiros é nula e as previsões produzidas tem variância mínima. Segundo Yamamoto e Landin (2013), a *Krigagem* ordinária é um método local de estimativa e, dessa forma, a estimativa em um ponto não amostrado resulta da combinação linear dos valores encontrados na vizinhança próxima em função da variação espacial representada por meio de um semivariograma. Diversos autores (Knotters, 1995; Albuquerque *et al.*, 1996; Bourennane, 2000; Vanwalleghem, 2010) utilizaram a *Krigagem* para construir mapas preditivos da espessura dos horizontes do solo.

Este capítulo tem como objetivo estimar a espessura do horizonte A antrópico por meio do método geostatístico *Krigagem* ordinária a fim de gerar superfícies de predição em transectos estabelecidos sobre três sítios localizados no Lago do Erepecú, na Reserva Biológica do Rio Trombetas, Oriximiná/PA.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1. Área de estudo

A área de estudo, denominada Reserva Biológica do Rio Trombetas, encontra-se localizada na região conhecida como alto Trombetas, no município de Oriximiná, extremo noroeste do estado do Pará. Limita-se a montante com a foz do rio Mapuera e a jusante com Porto Trombetas. O clima na bacia do rio Trombetas é caracterizado como úmido, o índice médio anual de umidade relativa é superior a 75% e apenas dois meses com média em torno de 70% (MMA, 2001). A vegetação dominante é do tipo floresta ombrófila densa (MMA, 2001). As classes de solo mais abundantes na área são os Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelho Amarelo e Plintossolos (IBGE, 2010). Os três sítios estudados estão localizados a margem do lago Erepecú, conforme apresentado na Figura 1.

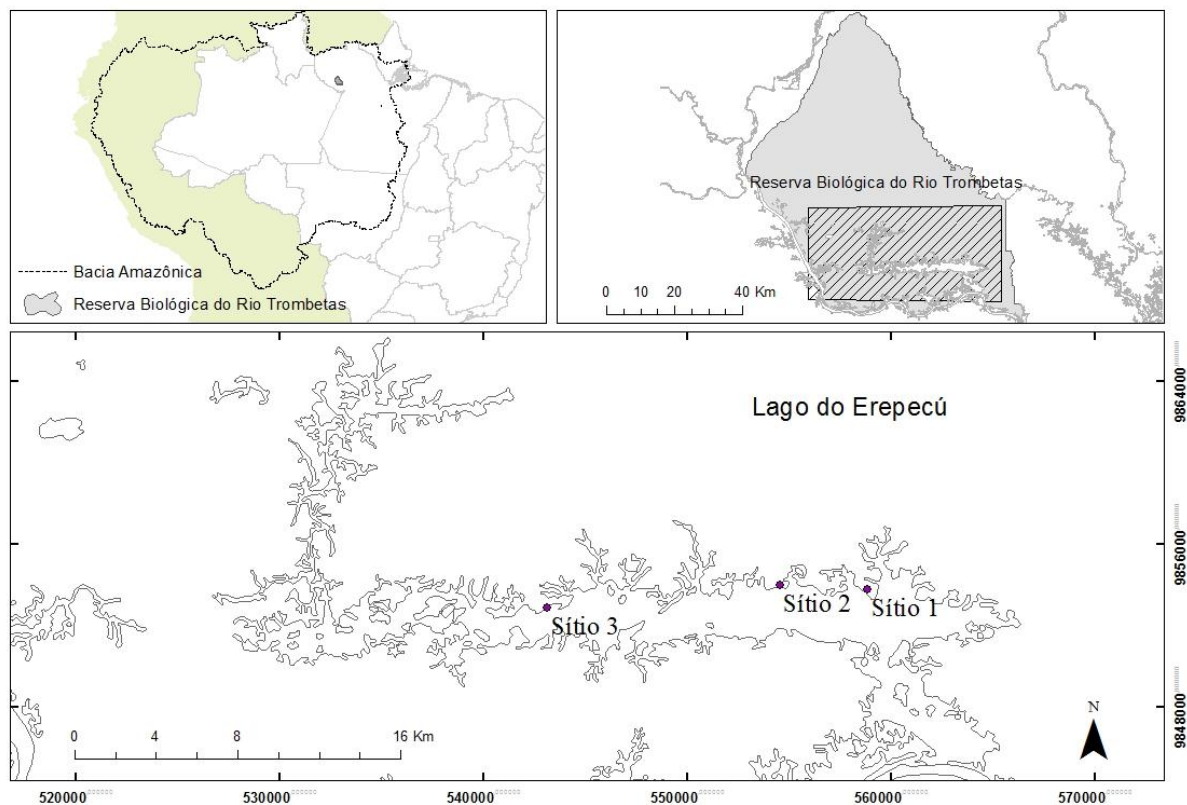


Figura 1. Mapa de localização dos sítios estudados.

1.2.2. Sondagem dos solos

A espessura do horizonte A antrópico nos transectos estudados foi observada através de sondagens com trado holandês, em caminhamento perpendicular a linha d'água até alcançar o solo adjacente, com distancia de 25 metros entre sondagens e 25 metros de entrelinhas, formando grades semirregulares com área aproximada de dois hectares. Os pontos das sondagens foram georreferenciados com GPS Garmin Map 78, utilizando coordenadas Universais Transversas de Mercator e Datum South American 1969.

1.2.3. Estatística Descritiva e Análise de Tendência

Os parâmetros observados foram organizados em planilha eletrônica com o software Microsoft Excel versão 2010 e submetidos a análises estatísticas no módulo Geostatistical Analyst do software ArcGis versão 10.1.

Foram realizadas análises estatísticas descritivas básicas, tais como média, mediana, mínimo, máximo e desvio padrão, assimetria e curtose. As frequências foram observadas por meio de histograma, e a normalidade das distribuições foi verificada por meio do teste Kolmogorov-Smirnov. A presença de tendência foi verificada por meio da plotagem da variável espessura do horizonte A antrópico no eixo Z em função das coordenadas X e Y. As tendências foram ajustadas por regressão com polinômio de 1ª ordem.

1.2.4. Interpolação por *Krigagem* ordinária

Os dados obtidos nas sondagens preliminares foram interpolados utilizando o método de predição geoestatística *Krigagem* ordinária, com remoção de tendência de 1ª ordem. Posteriormente, a superfície de tendência foi automaticamente adicionada para a obtenção de predições razoáveis (ESRI, 2003). O ajuste do semivariograma foi realizado segundo os seguintes critérios:

- (a) O parâmetro pepita foi ajustado “a sentimento”, observando as médias próximas à origem;
- (b) O ajuste do incremento e alcance foi realizado por mínimos quadrados ponderados;
- (c) O passo foi ajustado em 25 metros e o numero de passos ajustado em cinco. Pois o primeiro parâmetro coincide com a distância média entre as sondagens e o numero de passos multiplicado pelo passo deve corresponder aproximadamente à metade da

distancia máxima entre os pontos amostrados, segundo recomendações de Yamamoto e Landin (2013).

Os modelos teóricos testados foram o modelo circular, esférico, exponencial e gaussiano. Segundo Reis (2013) esses modelos podem ser descritos pelas equações a seguir:

$$\gamma(h) = \begin{cases} \frac{2(C_0+C_1)}{\pi} \left[\left(\frac{h}{a}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{h}{a}\right)^2} + \arcsin\left(\frac{h}{a}\right) \right], & \text{se } 0 \leq h \leq a; \\ C_0 + C_1, & \text{se } h > a. \end{cases}$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right], & \text{se } 0 \leq h \leq a; \\ C_0 + C_1, & \text{se } h > a. \end{cases}$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[1 - e^{-3\left(\frac{h}{a}\right)} \right], & \text{se } 0 \leq h \leq a; \\ C_0 + C_1, & \text{se } h > a. \end{cases}$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[1 - e^{-3\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right], & \text{se } 0 \leq h \leq a; \\ C_0 + C_1, & \text{se } h > a. \end{cases}$$

Os parâmetros de busca foram definidos conforme os critérios a seguir:

- Número de setores, 4, com 45° de inclinação, recomendado para distribuições regulares e semirregulares por Yamamoto e Landi (2013).
- Número mínimo de vizinhos 3.
- Número máximo de vizinhos igual a n/2, onde n é igual ao numero de observações.

1.2.5. Verificação do modelo por Validação cruzada

A validação cruzada é uma técnica de avaliação de erros de estimativas que permite comparar os valores previstos com os amostrados (Isaaks e Srivastava 1989; Vieira, 1998) a fim de escolher a melhor predição dentre um conjunto de modelos propostos.

Segundo (McBratney e Webster 1986; Cressie, 1993; Goovaerts, 1999; Gomes, 2007; Reis, 2013), a escolha do melhor modelo ajustado ocorre quando consideramos algumas estatísticas relativas a predição e ao desvio padrão da predição, em especial: a média dos erros de predição padronizados (*Mean Standardized Error, MS*); a Raiz Quadrada da Média do Quadrado das Diferenças entre os Valores Estimados e o Verdadeiro (*Root-Mean-Square,*

RMS); a raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre os valores estimados e o verdadeiro padronizado (*Root-Mean-Square-Standardized, RMSS*); o erro padrão da média do erro de predição (*Average Standard Error, ASE*). Segundo estes autores, o modelo mais ajustado é aquele em que o valor de *MS* e *RMS* estão mais próximos à zero, o valor de *RMSS* mais próximo a um, e *ASE* mais próximo de *RMS*. As estatísticas foram calculadas conforme recomenda Reis (2013), e estão representadas nas equações a seguir:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n [\hat{Z}_{(t_i)} - Z_{(t_i)}]}{n}$$

$$RMSS = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^n [\hat{Z}_{(t_i)} - Z_{(t_i)}]}{\hat{\sigma}_{(t_i)}} \right)^2}{n}}$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n [\hat{Z}_{(t_i)} - Z_{(t_i)}] \right)^2}{n}}$$

$$ASE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \hat{\sigma}_{(t_i)}}{n}}$$

1.2.6. Cálculo dos índices de dependência espacial

O semivariograma permite avaliar visualmente o comportamento da variável regionalizada, mas sem resultar diretamente em um valor único que possa expressar a dependência espacial. Contudo, a partir dos parâmetros estimados do seu modelo ajustado é possível construir uma medida de descrição.

Os índices de dependência espacial, ou Razão de Dependência (*RD%*) foram propostos por Biondi *et al.* (1994) e Cambardella *et al.* (1994), com ligeira diferença. O primeiro considera a contribuição em função do patamar, enquanto o segundo considera o efeito pepita em função do patamar. No presente estudo utilizaremos a fórmula proposta por Cambardella, conforme apresentado a seguir:

$$RD = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \cdot 100\%$$

Segundo Seidel e Oliveira (2012), uma medida que descreva a dependência espacial levando em consideração o alcance, é necessária e plausível para a avaliação de atributos de solo. Tal medida proposta é denominada Índice de Dependência Espacial Horizontal (*IDEH*), calculado pela fórmula apresentada a seguir:

$$IDEH = \left(\frac{a}{MMD} \right) \cdot 100\%$$

Além disso, os autores acima referidos propõem a construção de uma medida que descreva a dependência espacial levando em consideração tanto a caracterização vertical quanto a caracterização horizontal. O cálculo do Índice Conjunto de Dependência Espacial é feito segundo a fórmula:

$$ICDE = 0,5 \cdot (100 - RD) + 0,5 \cdot (IDEH)$$

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do mapeamento do horizonte A antrópico através do método da predição Geoestatística são apresentados nesta seção. As estatísticas básicas estão apresentadas na Tabela 1. Os valores médios e medianos foram aproximados, corroborando com as estatísticas de assimetria e curtose que indicaram séries com tendências centralizadas. Os valores máximos foram semelhantes para os três sítios, indicando possivelmente, períodos de ocupação semelhantes (Kern, 2003). As frequências estão representadas por meio dos histogramas, na Figura 2. As séries foram consideradas distribuições normais pelo teste Kolgomorov-Smirnov.

Tabela 1. Estatísticas descritivas básicas das sondagens no horizonte A antrópico.

Sítio	Observações	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose
1	18	58	61	10	86	21,73	-0,947	0,517
2	20	47	46	2	82	19,82	-0,308	-0,003
3	22	51	57	5	80	23,42	-0,742	-0,452

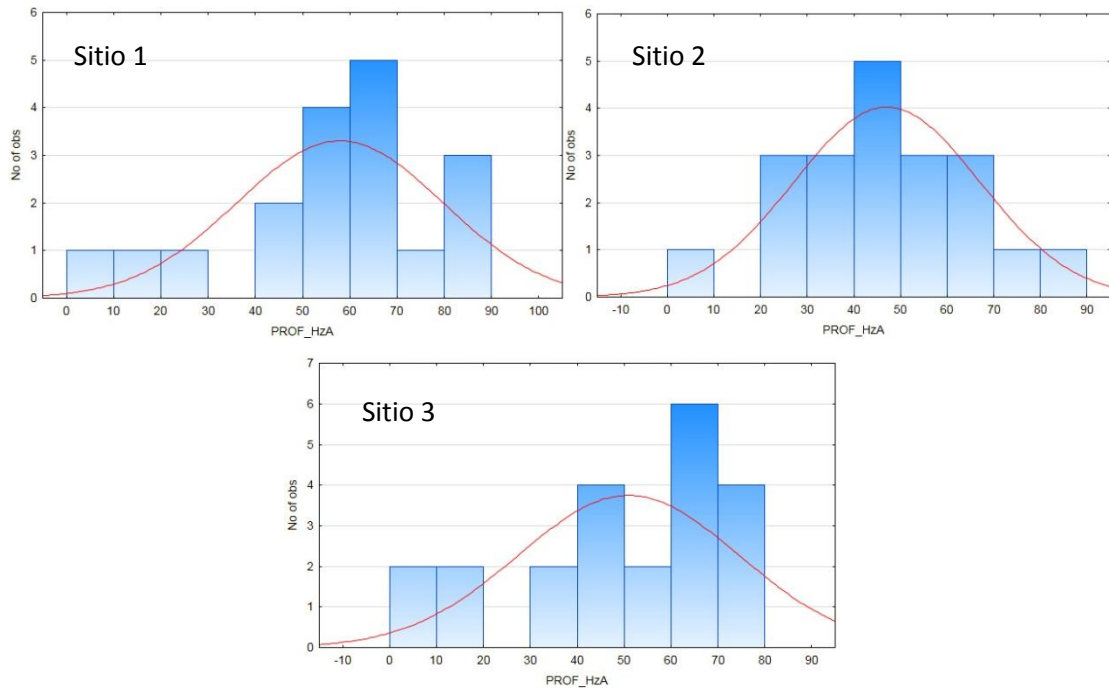


Figura 2. Histograma da espessura do horizonte A antrópico.

O posicionamento do transecto, perpendicular ao rio seguindo até encontrar solo adjacente, gerou uma tendência externa de diminuição da espessura do horizonte A antrópico. Esta tendência foi verificada através de plotagem dos resultados da sondagem no eixo Z, em função das coordenadas planas X e Y, conforme apresentado na Figura 3.

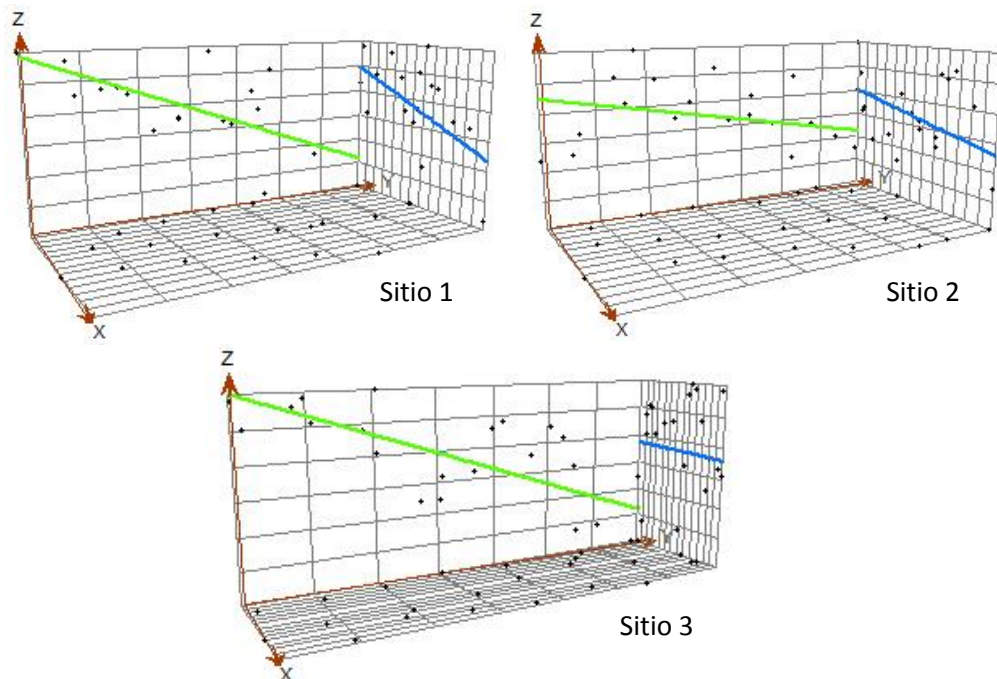


Figura 3. Análise de tendência, função de 1ª ordem.

O ajuste dos semivariogramas teóricos circular, esférico, exponencial e gaussiano, em função do semivariograma experimental no Sítio 1 é apresentado na Figura 4. Os parâmetros para os ajustes estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de ajuste para o Sítio 1.

Modelo	Pepita	Contribuição	Patamar	Alcance
Circular	50	146,2	196,2	66,4
Esférico	50	133,1	183,1	65,3
Exponencial	10	183,9	193,9	61,8
Gaussiano	70	124,8	194,8	61,8

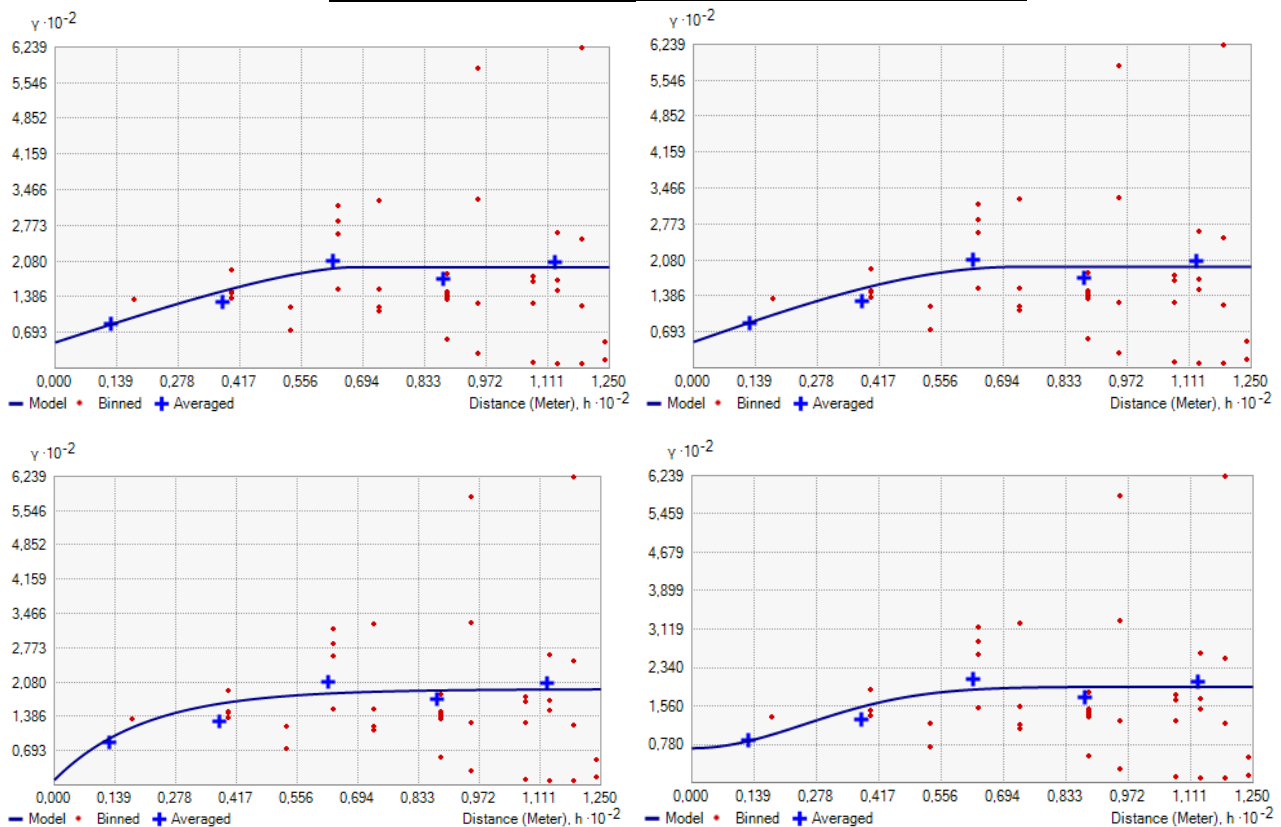


Figura 4. Sítio 1. Ajuste de Semivariograma modelos Circular, Esférico, Exponencial e Gaussiano.

Os parâmetros para os ajustes estão apresentados na Tabela 3. O ajuste dos semivariogramas teóricos circular, esférico, exponencial e gaussiano, em função do semivariograma experimental fruto das sondagens do horizonte A antrópico no Sítio 2 é apresentado na Figura 5.

Tabela 3. Parâmetros de ajuste para o Sítio 2.

Modelo	Pepita	Contribuição	Patamar	Alcance
Circular	5	307,2	312,2	61,8
Esférico	5	297,7	302,7	61,8
Exponencial	5	314,0	319,0	81,4
Gaussiano	35	277,7	312,7	61,8

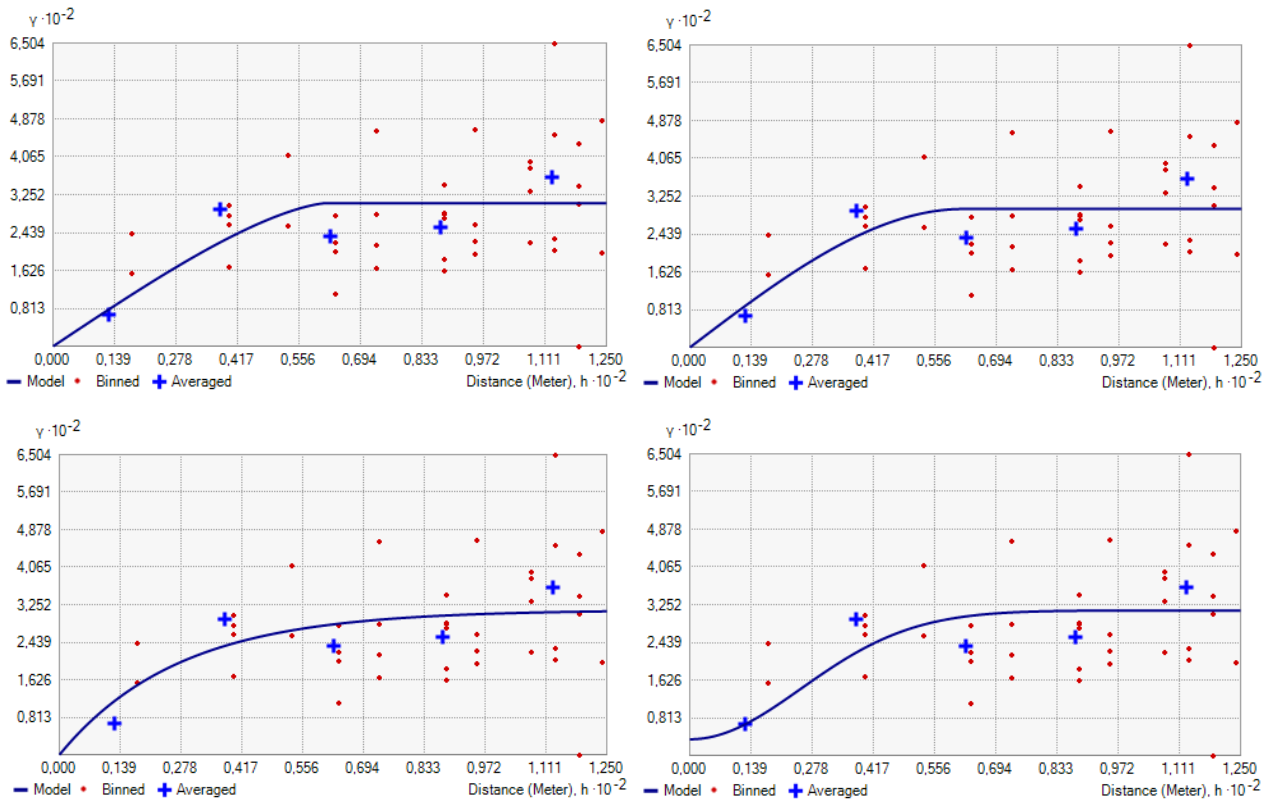


Figura 5. Sítio 2. Semivariograma modelos Circular, Esférico, Exponencial e Gaussiano.

Os parâmetros para os ajustes estão apresentados na Tabela 4. O ajuste dos modelos teóricos circular, esférico, exponencial e gaussiano, em função do semivariograma experimental fruto das sondagens do horizonte A antrópico no Sítio 3 é apresentado na Figura 6. Os valores do parâmetro pepita nos ajustes de todos os modelos aos três sítios possivelmente estão relacionados à interferência antrópica, geradora de padrões complexos e descontínuos. Isso pois, sítios de Terra Preta geralmente são frutos de múltiplos assentamentos, sobrepondo em sua estratificação áreas de habitação, despejo de resíduos e cultivo (Sombroek, 1966).

Nos solos não-antrópicos as espessuras dos horizontes tendem a apresentar alta continuidade na origem (Journel e Huijbregts, 1978); ou seja, baixos valores pepita, mostrando comportamento parabólico característico de uma variabilidade espacial regular. Segundo Kachanoski *et al.* (1985) a microtopografia explica 25% da variação da espessura dos horizontes A nesses casos, sendo a principal variável independente à ser considerada para sua predição.

Tabela 4. Parâmetros de ajuste para o Sítio 3.

Modelo	Pepita	Contribuição	Patamar	Alcance
Circular	180	63,3	243,3	69,1
Esférico	180	63,7	243,7	79,8
Exponencial	180	65,4	245,4	100,0
Gaussiano	195	56,1	251,1	83,5

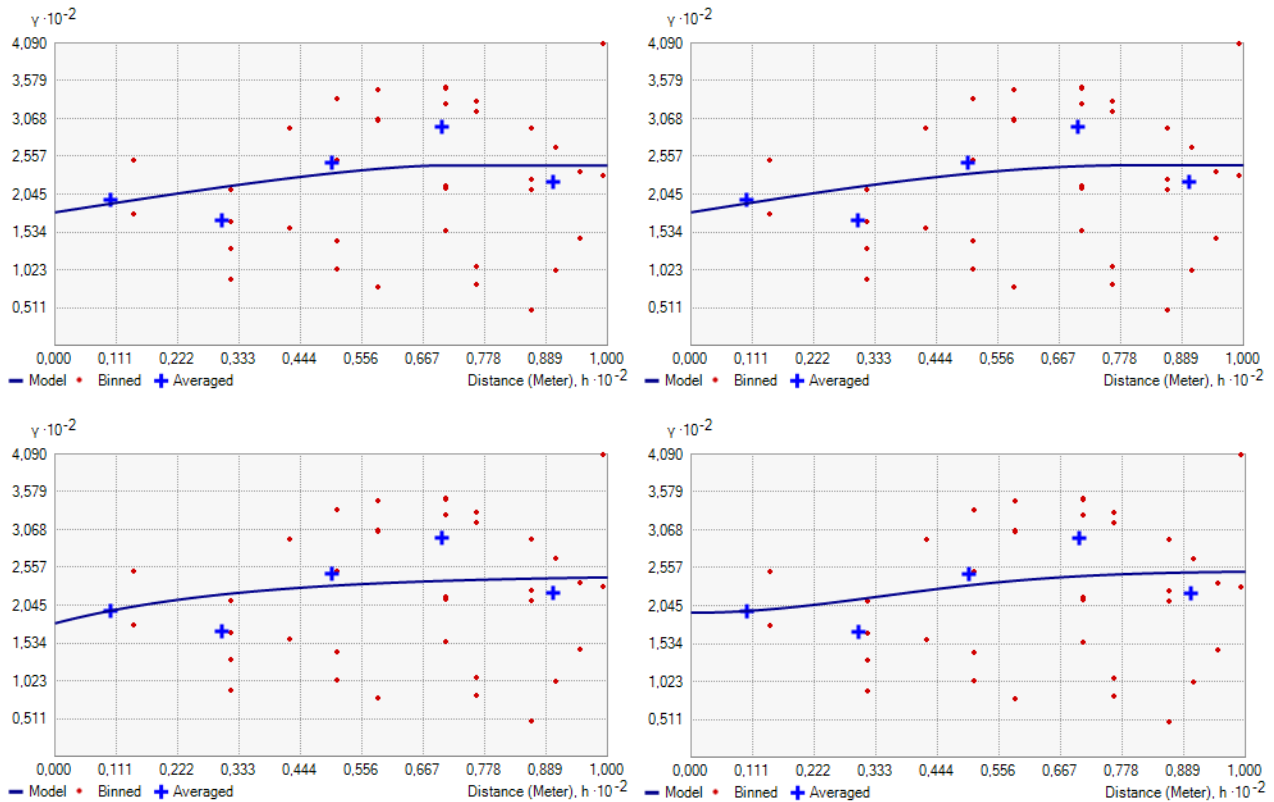


Figura 6. Sítio 3. Semivariograma modelos Circular, Esférico, Exponencial e Gaussiano.

As estatísticas descritivas da validação cruzada estão apresentadas na Tabela 5. Os modelos apresentaram leve enviesamento positivo. O modelo exponencial apresentou esta tendência de forma mais atenuada nos três sítios estudados.

Os modelos apresentaram resultados satisfatórios para a acurácia do desvio padrão da predição, estimada através da estatística *RMSS*, nos três sítios estudados. Quanto à incerteza associada às predições, comparando *RMS* e *ASE*, os modelos exponencial e esférico superestimaram a variabilidade da predição em dois dos três sítios estudados, enquanto os modelos circular e gaussiano obtiveram resultado oposto. Novamente o modelo exponencial se destaca, apresentando o melhor resultado em dois dos três sítios.

Por outro lado, o desvio do valor modelado em relação ao valor mensurado, associado à estatística *RMS*, foi bastante significativo em todos os casos. Este resultado provavelmente ocorre devido às incertezas associadas a descontinuidades resultantes da interferência antrópica no processo de pedogênese.

Tabela 5. Indicadores obtidos por Validação Cruzada.

Sítio	Modelo	<i>MS</i>	<i>RMSS</i>	<i>RMS</i>	<i>ASE</i>
1					
	Circular	0,0765	1,217	15,072	12,358
	Esférico	0,0759	1,172	14,859	12,618
	Exponencial	0,0667	1,120	14,702	13,234
	Gaussiano	0,0762	1,185	14,945	12,503
2					
	Circular	0,0772	0,984	14,410	14,169
	Esférico	0,0621	0,940	14,712	15,298
	Exponencial	0,0616	0,979	15,727	15,889
	Gaussiano	0,0728	0,971	13,985	13,831
3					
	Circular	0,0738	0,979	15,117	15,536
	Esférico	0,0538	0,975	15,025	15,511
	Exponencial	0,0351	0,992	15,328	15,533
	Gaussiano	0,0432	0,979	15,079	15,488

Os índices de dependência espacial estão apresentados na Tabela 6. O índice *RD* denotou dependência moderada tendendo a forte no sítio 2 e tendendo a fraca no sítio 3. Apenas no sítio 1 houve diferenciação entre modelos, onde o modelo exponencial apresentou dependência forte enquanto os modelos circular, esférico e gaussiano dependência moderada. Albuquerque *et al.* (1996), modelando a espessura do horizonte A em um solo Podzólico Vermelho-amarelo, em espaçamento entre sondagens de 10 x 50 metros, encontrou *RD* 11, apontando para maior grau de dependência espacial em solos não antrópicos quando comparados aos solos antrópicos.

Tabela 6. Índices de Dependência Espacial

Sítio	Modelo	<i>RD</i>	<i>IDEH</i>	<i>ICDE</i>
1				
	Circular	25,49	65,58	70,04
	Esférico	27,30	64,53	68,62
	Exponencial	5,16	61,05	77,95
	Gaussiano	35,93	61,05	62,56
2				
	Circular	1,60	62,74	80,57
	Esférico	1,65	62,74	80,54
	Exponencial	1,57	82,59	90,51
	Gaussiano	11,19	62,74	75,77
3				
	Circular	73,97	66,45	46,24
	Esférico	73,85	76,75	51,45
	Exponencial	73,34	96,12	61,39
	Gaussiano	77,65	80,28	51,32

O índice horizontal de dependência espacial alcançou níveis mais elevados no sítio 3, justificando a superfície de predição mais suave. Notadamente o modelo circular obteve menor suavização em dois dos três sítios, enquanto o modelo exponencial apresentou resultado oposto. O modelo exponencial apresentou também o maior *ICDE* em todos os sítios.

Os mapas de predição da espessura do horizonte A antrópico e do desvio padrão da predição, gerados através de quadro modelos de semivariogramas teóricos, são apresentados nas figuras 7, 8, 9 para os sítios um (1), dois (2) e três (3), respectivamente. O modelo gaussiano apresentou uma distribuição mais uniforme do desvio padrão da predição para toda a área amostrada, significando em uma distribuição mais regular do erro. No modelo exponencial, por sua vez, foi verificada tendência oposta. Os modelos circulares e esféricos obtiveram resultados intermediários.

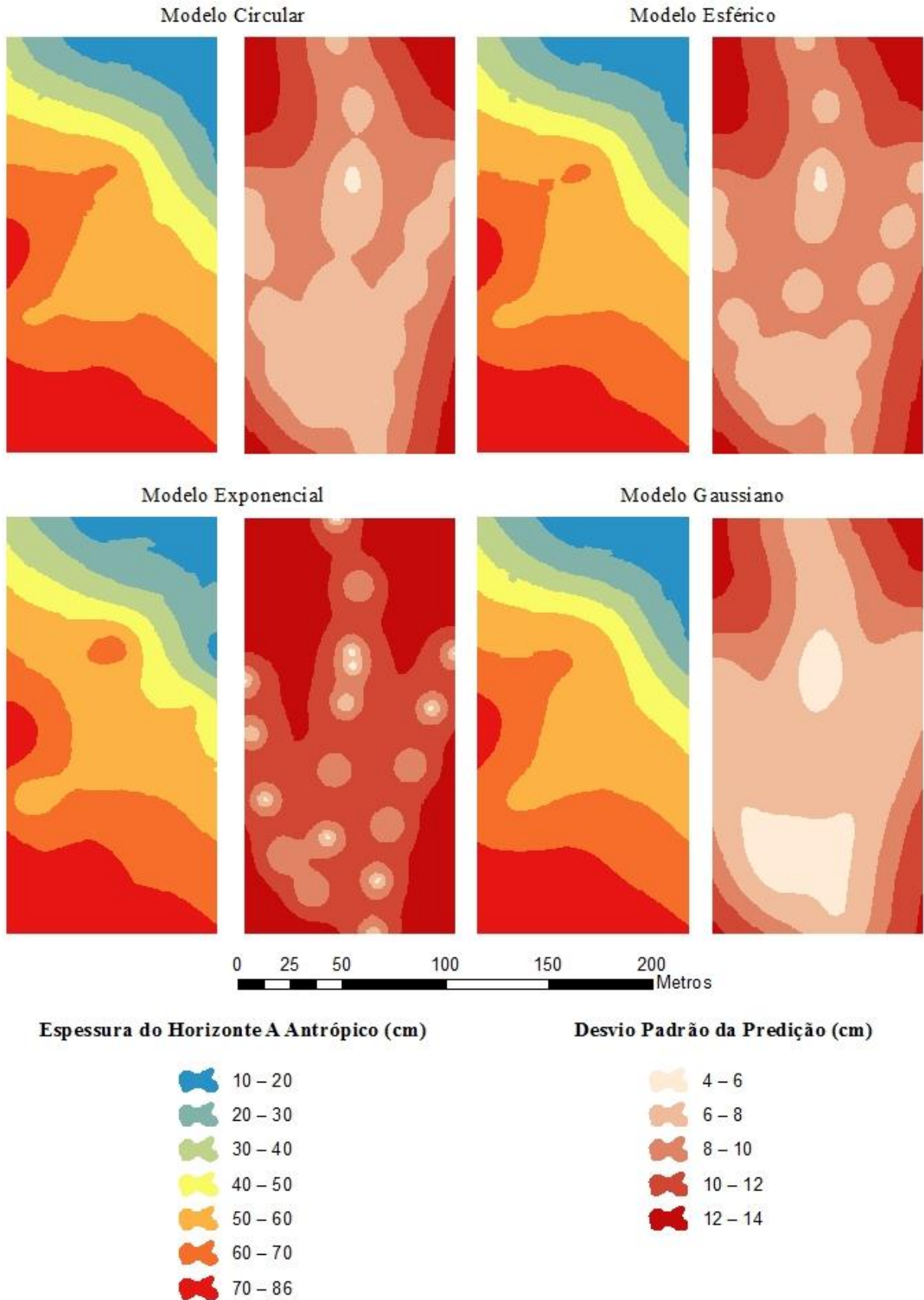


Figura 7. Mapas de predição e desvio padrão da predição, Sítio 1.

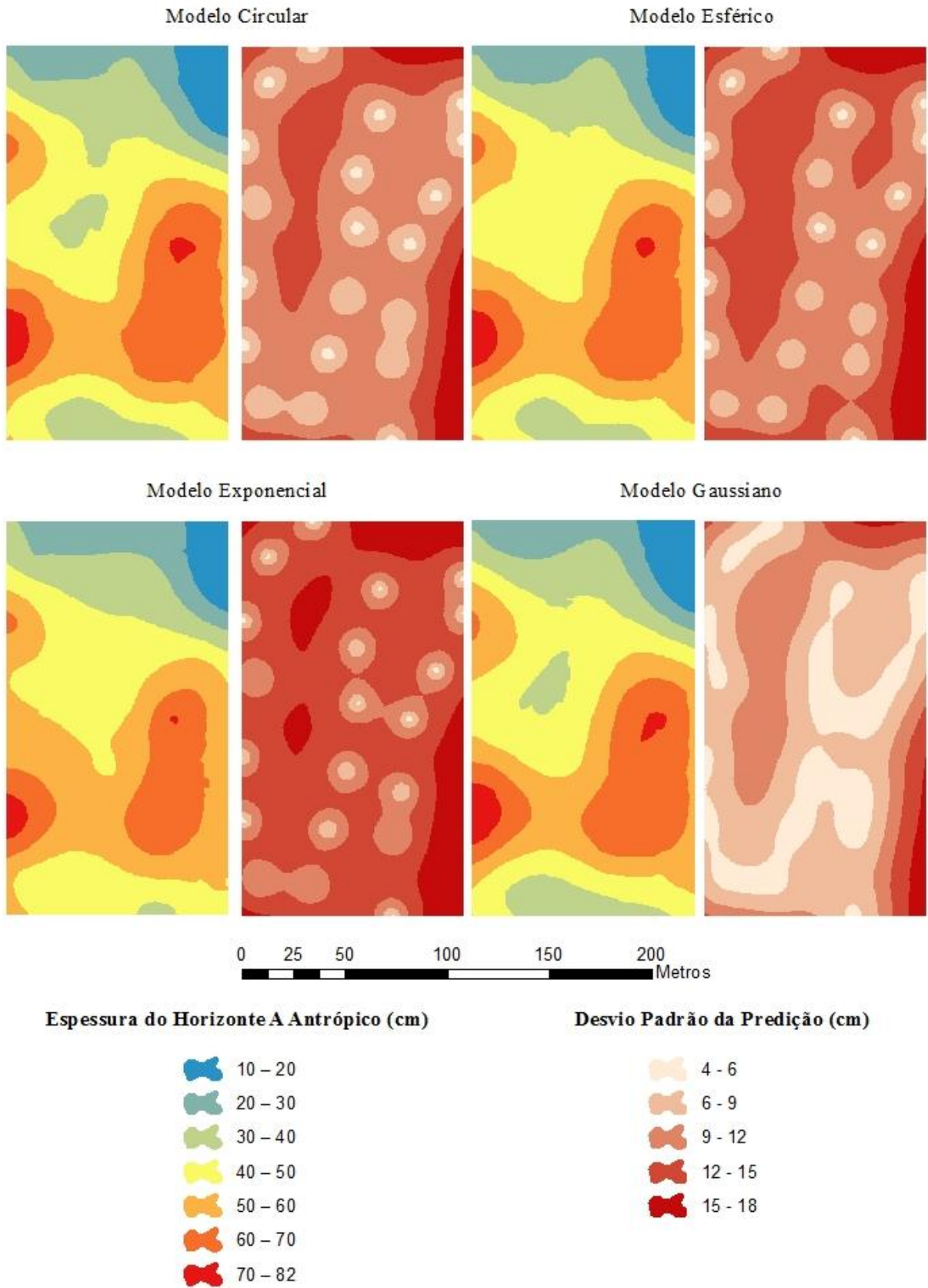
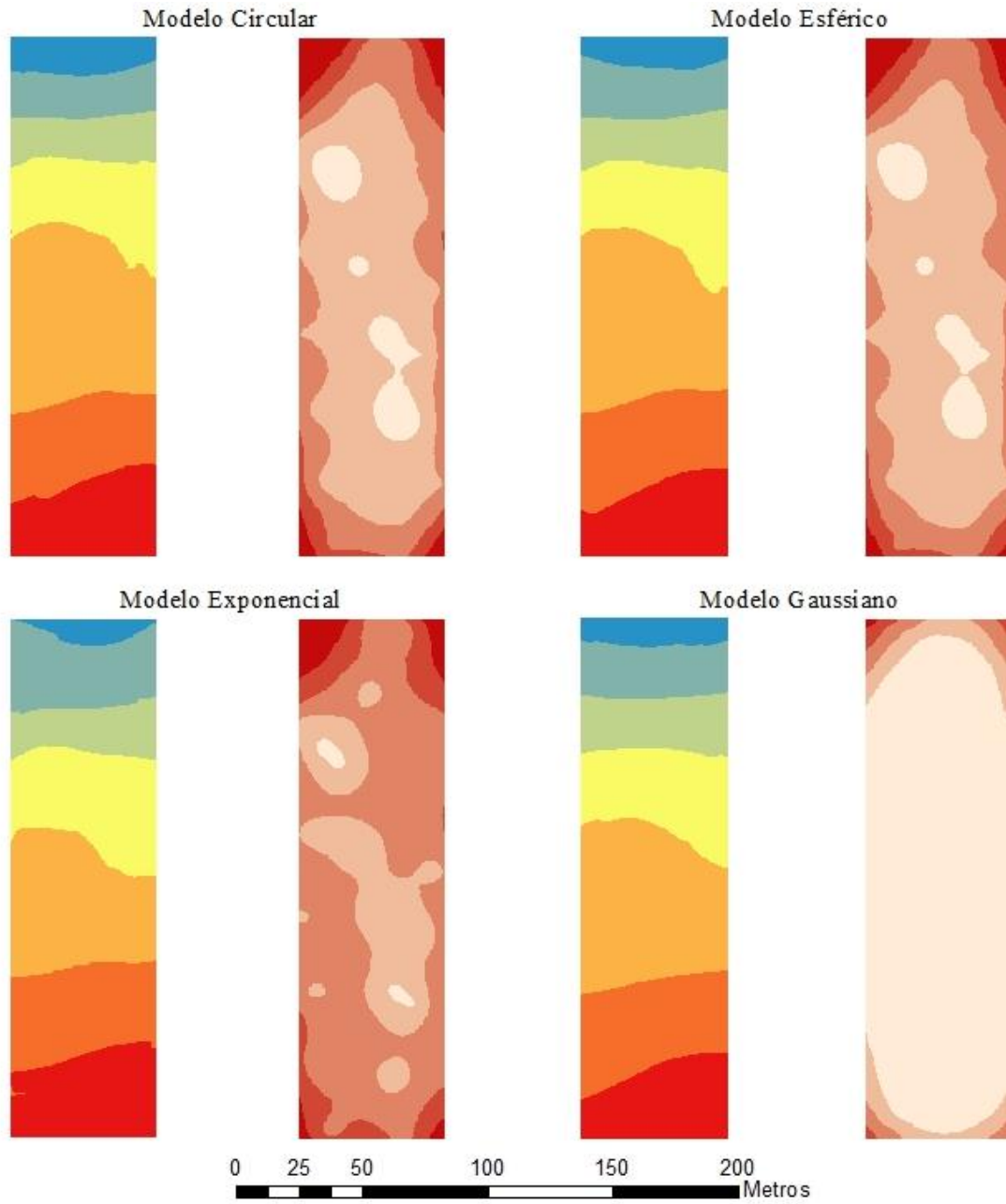


Figura 8. Mapas de predição e desvio padrão da predição, Sítio 2.



Espessura do Horizonte A Antrópico (cm)



Desvio Padrão da Predição (cm)

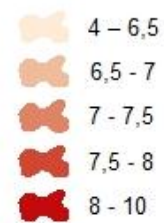


Figura 9. Mapas de predição e desvio padrão da predição, Sítio 3.

1.4. CONCLUSÕES

A interferência antrópica na produção dos solos gera padrões complexos e sobrepostos, resultando em descontinuidades na espessura do horizonte A antrópico. Como consequência as superfícies de predição são ligeiramente suavizadas.

O modelo teórico exponencial é o que melhor se ajusta ao semivariograma experimental, e, portanto é o mais indicado para a predição por *Krigagem* ordinária na escala de estudo proposta, em solos com horizontes A antrópicos.

2.5. REFERÊNCIAS

- Albuquerque, J.A.; Reinert, D.J.; Fiorin, J.E. Variabilidade de solo e planta em podzólico vermelho-amarelo. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 20:151-157, 1996.
- Biondi, F.; Myers, D.E.; Avery, C.C.; Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. Can. J. For. Res., 24: 1354-1368, 1994.
- Bourennane, H.; King, D.; Couturier, A. Comparison of kriging with external drift and simple linear regression for predicting soil horizon thickness with different sample densities. Geoderma 97 (2000) 255-271.
- Cambardella, C.A.; Moorman, T.B.; Novak, J.M.; Parkin, T.B.; Karlen, D.L.; Turco, R.F.; Konopka, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. Soil. Sci. Soc. Am. J., 58: 1501-1511, 1994.
- Cressie, N.A.C. Statistics for spatial data. New York: John Wiley, 1993.
- ESRI. ArcGIS 9: Using ArcGIS Geostatistical Analyst. California, USA, 2003.
- Falcão, N.P.S.; Moreira, A.; Comenford, N.B. 2010. A fertilidade dos solos de terra preta de índio da Amazônia Central. In: Teixeira, W.G. (org.). As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.

- Gomes, N.M. Métodos de Ajuste de Modelos de Semivariograma Aplicados ao Estudo da Variabilidade Espacial de Atributos Físico-Hídricos do Solo. Universidade Federal de Lavras - Dissertação (Mestrado) – Lavras, MG, 2007.
- Goovaerts, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma* 89 (1999) 1-45.
- Guerra, P.A.G. Geoestatística operacional. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 1988, 145p.
- IBGE. 2001. Mapa de solos do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2001. 1 mapa, color. Escala 1:5.0.0. Disponível em: <<http://w.ibge.gov.br>>. Acesso em: 18 mai. 2012.
- Isaaks, E.H.; Srivastava, R.M. An introduction to Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989.
- Journel, A.G. & Huijbregts, C.J. Mining geostatistics. London: Academic Press, 1978. 600p.
- Kachanoski, R.G.; Rolston, D.E; Jonge, E. Spatial variability of a cultivated soil as affected by past and present microtopography. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 49(5) 1082=1087, 1985.
- Kämpf, N.; Woods, W.I.; Kern, D.C.; Cunha, T.J. 2010. Classificação de Terras Pretas de Índio e Outros Solos Antrópicos Antigos. In: Teixeira, W.G. (org.). *As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas*. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- Kern D.C.; D’Aquino, G.; Rodrigues, T.E.; Franzão, F.J.L.; Sombroek, W.; Myers T.P.; Neves, E.G. 2003. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: Lehman et al (eds), *Amazonian Dark Earths: Origin, properties, management*. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands: 51-75

- Knotters, M.; Brus, D.J.; Oude Voshaar, J.H. A comparison of kriging, co-kriging and kriging combinend with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations. *Geoderma* 67 (1995) 227-246.
- Krige, D.G.A. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the witwatersrand. *Journal of South African Institution of Mining and Metallurgy*, Johannesburg, v. 52, p.119-139, 1951.
- Lima, H.N.; Schaefer, C.E.R; Mello, J.W.V.; Gilkes, R.J.; Ker, J.C. Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. *Geoderma* 110 (2002): 1-17.
- Matheron, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, v. 58, p.1246-1266, 1963.
- McBratney, A.B.; Webster, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal Soil Science*, Oxford, v. 37, n. 3. P 617-639, 1986.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. 2001. Plano de manejo da Floresta Nacional de Saracá-Taquera, Estado do Pará – Brasil. Curitiba. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/flonasaraca>>. Acesso em: 10 de março de 2011.
- Olea, R.A. Optimum mapping techniques using regionalized variable theory. Lawrence, university of Kansas, 1975. 137p. (Series on Spatial Analysis, 2)
- Pires, C.A.F. Geoestatística Aplicada. Instituto de Geociências – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010. 154p.
- Reis, C.P. Simulação de fatores que afetam as predições obtidas por Krigagem Ordinária. Universidade Federal de Viçosa - Dissertação (Mestrado), Viçosa, MG, 2013.
- Seidel, E.J.; Oliveira, M.S. Descrição da dependência espacial em Geoestatística através da construção de dois índices. Anais da 57ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, ESALQ, SP, 2012.

- Sombroek, W.G. 1966. Amazon Soils: A Reconnaissance of The Soils of the Brazilian Amazon Valley. Pudoc, Wageningen. 292p.
- Sturaro, J.R. 1993. Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
- Vanwalleghem, T.; Poesen, J.; McBratney, A.; Deckers, J. Spatial variability of soil horizon depth in natural loess-derived soils. *Geoderma* 157 (2010) 37-45.
- Vieira, S.R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: *Sistema de Informações Geográficas*. Curitiba, PR: [s.n.], 1998. p.-1-48.
- Yamamoto, J.K.; Landin, P.M.B. 2013. Geoestatística: conceitos e aplicações. São Paulo : Oficina de Textos, 214p.

Capítulo II

Caracterização Física e Química em Função da Espessura do Horizonte A Antrópico em Terra Preta e Terra Mulata na Reserva Biológica do Rio Trombetas, Oriximiná- PA.

Caracterização Física e Química em Função da Espessura do Horizonte A Antrópico em Terra Preta e Terra Mulata na Reserva Biológica do Rio Trombetas, Oriximiná- PA.

Cauan Ferreira Araújo¹

¹ Pós-graduando em Agricultura no Trópico Úmido, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Av. André Araújo, 2936, Aleixo. 69060-001, Manaus, AM.
cauanaraujo@yahoo.com.br

RESUMO

A pesquisa aqui resumida objetiva estimar o estoque de carbono e nitrogênio em manchas de Terra Preta de Índio em função de glebas determinadas por categorias de espessura do horizonte A antrópico. Para este fim foram realizados levantamentos em três sítios na Reserva Biológica do rio Trombetas, região da calha-norte, município de Oriximiná/PA. A distribuição espacial da espessura do horizonte A antrópico em cada mancha foi determinada por meio de sondagens, em grade semiregular de 25m x 25m, e interpolação com o método geoestatístico de interpolação *Krigagem* ordinária. A amostragem do solo foi realizada em parcelas de 10m x 10m, com três repetições para cada categoria de espessura do horizonte A antrópico, nos incrementos 0-10cm, 10-20cm, 20-50cm, 50-100cm. A relação Carbono total : Nitrogênio total foi determinada por meio de combustão a seco. Os resultados permitem concluir que os sítios possuem estoques de C e N total no primeiro metro de solo superiores aos encontrados nos solos adjacentes imediatos, alcançando médias de 293,37 t C ha⁻¹ e 149,17 t N ha⁻¹, e 219,33 t C ha⁻¹ e 121,30 t N ha⁻¹ em Terra Preta e Terra Mulata, respectivamente. A relação C:N foi significativamente superior nas camadas subsuperficiais de ambos os sítios classificados como Terra Preta, porém não em Terra Mulata. Logo, conclui-se que os termos Terra Preta e Terra Mulata guardam processos antropogênicos distintos que resultam em condições diferenciadas em subsuperfície. A divisão por glebas tendeu diferenciar a gleba mais espessa em oposição à gleba menos espessa e ao solo adjacente imediato quanto aos estoques de C, N, indicando que ambos os modelos antropogênicos, “lixreira” e “agrícola”, apresentam comportamentos espaciais associados a núcleos de deposição.

Palavras-chave: Terra Preta de Índio; Estoque de Carbono e Nitrogênio; Relação C:N.

Physical and Chemical Characterization as a Function of Thickness of Anthropogenic Horizon in Terra Preta and Terra Mulata in the Biological Reserve of Rio Trombetas, Oriximiná/PA.

ABSTRACT

The research summarized here aims to estimate the stock of carbon and nitrogen in patches of *Terra preta* on function plots determined by thickness categories of anthropogenic A horizon. To this end surveys were conducted at three sites in the Biological Reserve of the Rio Trombetas region trough - north city of Oriximiná/PA. The spatial distribution of anthropogenic A horizon thickness in each spot was determined by polls, semiregular grid of 25m x 25m, and geostatistical interpolation method of ordinary kriging interpolation . Soil sampling was conducted in plots of 10m x 10m, with three replicates for each thickness category of anthropogenic A horizon in increments 0 - 10cm, 10 -20cm, 20 - 50cm , 50 - 100cm. The relationship Carbon total: Total nitrogen was determined by dry combustion. The results indicate that the sites have stocks of C and N in the first meter of soil than those found in soils adjacent immediate, reaching averages of 293.37 t C ha⁻¹ and 149.17 t ha⁻¹ N , and 219, 33 t C ha⁻¹ and 121.30 t ha⁻¹ N in *Terra preta* and *Terra Mulata*, respectively. The C: N ratio was significantly higher in the subsurface layers of both sites classified as *Terra preta*, *Terra Mulata* but not in. Therefore, it is concluded that the terms *Terra preta* and *Terra Mulata* keep distinct anthropogenic processes that result in different subsurface conditions. The division of plots tended to differentiate the plot thickened as opposed to the soil less thick and the ground immediately adjacent to stocks as C , N. both models indicating that anthropogenic " bin" and " farm " to show behaviors associated spatial deposition nuclei.

Keywords: *Terra preta*, stock Carbon and Nitrogen, C : N Ratio.

2.1. INTRODUÇÃO

O compartimento de carbono do solo é o maior nos ecossistemas terrestres, com aproximadamente quatro vezes o carbono da vegetação (Machado, 2005). Na terra firme amazônica, predominam as classes dos Latossolos e Argissolos, na várzea predominam a classe dos Gleissolos (IBGE, 2001). Segundo Sombroek *et al.* (2003), somente 0,1 a 0,3% da área da bacia amazônica corresponde a solos muito férteis com horizonte A antrópico rico em carbono, denominado Terra Preta de Índio. Segundo diversos autores (Sombroek *et al.*, 1966; Kern e Kampf, 1989; Glaser, 2001; Denevan, 2010; Arroyo-Kalin, 2012) tais solos são fruto de dois processos antropogênicos distintos, formadores das categorias Terra Preta e Terra Mulata, o primeiro relacionado ao processo de varrer-e-carbonizar resíduos da habitação, o segundo, associado à práticas agrícolas semi-intensivas ainda não inteiramente elucidadas, correspondendo ao modelo “lixreira” e “agrícola” respectivamente.

O fenômeno vem ganhando interesse internacional porque se assume que a Terra Preta de Índio pode ser um modelo para a promoção da agricultura sustentável nos trópicos úmidos e porque a terra preta é um exemplo de sequestro de CO₂ de longo prazo em ecossistemas terrestres com benefícios adicionais para os ecossistemas florestais (Glaser, 2012). Nesse contexto, Sombroek (2002) destaca a importância de estudos que quantifiquem o estoque de carbono para que se estabeleça uma política ampla para o manejo de áreas de Terras Pretas na região amazônica, através de financiamentos por Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (*Clean Development Mechanism*) do protocolo de Kyoto, ou similares.

Este capítulo tem como objetivo observar as possíveis correlações entre o estoque de carbono e nitrogênio e a espessura do horizonte A antrópico em Terra Preta de Índio nos sítios localizados no Lago do Erepecú, na Reserva Biológica do Rio Trombetas, Oriximiná/PA.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Área de estudo

A área de estudo, denominada Reserva Biológica do Rio Trombetas, encontra-se localizada na região conhecida como alto Trombetas, no município de Oriximiná, extremo noroeste do estado do Pará. Limita-se a montante com a foz do rio Mapuera e a jusante com Porto Trombetas. O clima na bacia do Rio Trombetas é caracterizado como úmido, o índice médio anual de umidade relativa é superior a 75% e apenas dois meses com média em torno de

70% (MMA, 2001). A vegetação dominante é do tipo floresta ombrófila densa (MMA, 2001). As classes de solo mais abundantes na área são os Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelho Amarelo e Plintossolos (IBGE, 2010).

Os três sítios estudados foram localizados a margem do lago Erepecú através da indicação de informantes comunitários, em incursão a campo realizada entre os dias 20 de setembro e 06 de outubro de 2012. A caracterização morfológica do solo, sondagens preliminares e coletas de amostras de solo, volumétricas e compostas, foram realizadas em atividades de campo entre os dias 14 e 28 de maio de 2013.

2.2.2. Caracterização morfológica dos perfis

A fim de caracterizar o solo dos sítios estudados foi aberta uma trincheira em cada sítio, com dimensões de 60cm x 60cm, por 100cm de profundidade. Em cada trincheira foi realizada a descrição morfológica do perfil de solo seguindo a sistematização estipulada por Amaral *et al.* (1998). Para tal, foram anotadas em ficha padrão as características gerais do relevo e vegetação, aspectos relativos à profundidade e à transição entre horizontes, pedregosidade, rochosidade, relevo, declividade, drenagem e erosão, além da cerosidade, cimentação, presença e forma de concreções minerais. As cores foram verificadas com auxílio da carta de Munsell para solos.

2.2.3. Predição da espessura do horizonte A antrópico

A espessura do horizonte A antrópico nos transectos estudados foi aferida através de sondagens preliminares com trado holandês, em caminhamento perpendicular a linha d'água até alcançar o solo adjacente, com distância de 25 metros entre sondagens e 25 metros de entrelinhas, formando grades semirregulares com área aproximada de dois hectares. Os pontos das sondagens foram georreferenciados com GPS Garmin Map 78, com precisão média de 5 metros, utilizando coordenadas Universais Transversas de Mercator e Datum South American 1969.

Os dados obtidos nas sondagens preliminares foram interpolados utilizando o método de predição geoestatística *Krigagem* Ordinária, ajustado conforme referido no capítulo anterior. A qualidade do ajuste foi avaliada através da validação cruzada e dos índices de dependência espacial. O modelo teórico que obteve melhor ajuste foi o exponencial. A partir deste foram produzidos mapas preditivos e mapas com o desvio padrão da predição.

Posteriormente os sítios foram zoneados em glebas em função da espessura do horizonte A antrópico, segundo critérios da legenda de classificação de arqueantossolos de Kämpf (2010). As glebas foram classificadas como cumúlicas, igual ou acima de 60cm de espessura do horizonte A; intermediárias, com o horizonte A antrópico igual ou superior a 20cm e inferior a 60cm; e solo adjacente imediato, quando a espessura do horizonte A antrópico é inferior a 20cm.

2.2.4. Amostragem

Para realizar as coletas de solo foram posicionadas ao acaso três parcelas de 10m x 10m, em cada uma das três glebas, para cada um dos três sítios estudados, totalizando 27 parcelas conforme apresentado na Figura 1. As parcelas foram georreferenciadas com GPS Garmin Map 78, com precisão média de 5 metros, utilizando coordenadas Universais Transversas de Mercator e DATUM South American 1969. Foram realizadas sondagens no horizonte A antrópico com trado holandês em cada um dos vértices, para obtenção da espessura média da parcela. Em seguida, foram coletadas três repetições de amostras volumétricas, com trado de amostra indeformada e anéis volumétricos de 100cm³, nas camadas 0-10cm, 10-20cm, 20-50cm e 50-100cm. Por fim, foram coletadas amostras compostas com trado holandês, a partir de dez pontos no interior da parcela, nas camadas 0-10cm, 10-20cm, 20-50cm e 50-100cm. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos numerados.

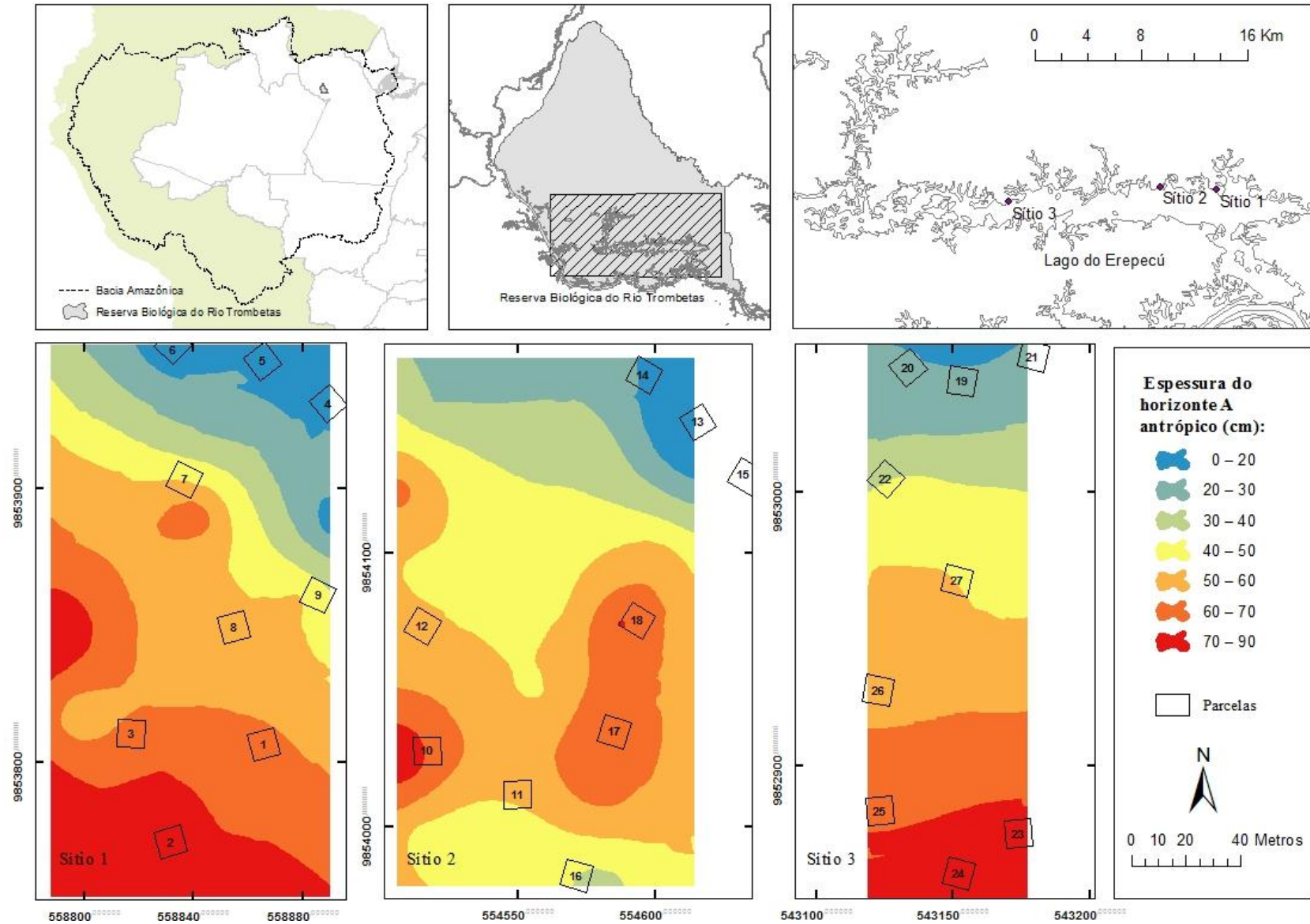


Figura 1. Localização das parcelas para amostragem de solo.

2.2.5. Preparo das amostras

As amostras foram transportadas até o Campus do V-8, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia e seu preparo seguiu recomendações da Embrapa (1997). As amostras compostas, cujo n=108, foram colocadas para secar ao ar em casa de vegetação por 96 horas, posteriormente destorroadas em peneira de 2mm e novamente acondicionadas em sacos plásticos numerados para entrada no Laboratório Temático de Solo e Planta, localizado no mesmo Campus. As amostras volumétricas, cujo n=324, foram secas em estufa a 105°C por 24 horas.

2.2.6. Análises físicas

Foram determinadas por meio dos métodos recomendados pela Embrapa Solos (1997) as seguintes propriedades físicas triviais do solo: densidade aparente do solo, densidade de partículas, porosidade total e frações granulométricas.

A densidade do solo foi obtida determinando o volume do anel de coleta com auxílio de paquímetro, e efetuando a pesagem das amostras. O cálculo foi efetuado através da seguinte fórmula:

$$\text{Densidade do solo (g / cm}^3\text{)} = a / b$$

a = peso da amostra seca a 105°C (g)

b = volume do anel (cm³)

A densidade de partículas foi obtida pesando 20g de solo seco em estufa a 105°C, e em seguida foi transferido para balão aferido de 50ml, o qual foi completado com álcool etílico usando-se uma bureta, anotando-se o volume de álcool necessário. O cálculo foi efetuado através da seguinte fórmula:

$$\text{Densidade da partícula (g / cm}^3\text{)} = a / 50 - b$$

a = peso da amostra seca a 105°C

b = volume de álcool gasto

A porosidade total foi calculada através da seguinte fórmula:

$$\text{Porosidade total (\%)} = [1 - (b / a)] \times 100$$

a = densidade de partículas

b = densidade aparente do solo

A análise granulométrica foi realizada através do método da dispersão total. Tal método “baseia-se na velocidade de queda das partículas que compõem o solo. Fixa-se o tempo para o deslocamento vertical na suspensão do solo com água, após a adição de um dispersante químico. Pipeta-se um volume da suspensão, para determinação da argila que seca em estufa é pesada. As frações grosseiras (areia) são separadas por tamisação, secas em estufa e pesadas para obtenção dos respectivos percentuais. O silte corresponde ao complemento dos percentuais para 100%. É obtido por diferença das outras frações em relação à amostra original” (Embrapa, 1997). O cálculo de cada fração foi efetuado através das seguintes fórmulas:

$$\text{argila (\%)} = [\text{argila (g)} + \text{dispersante (g)}] - \text{dispersante (g)} \times 1.000$$

$$\text{areia (\%)} = \text{areia (g)} \times 50$$

$$\text{silte (\%)} = 1.000 - [\text{argila (g)} + \text{areia (g)}]$$

2.2.7. Análises químicas

Para a determinação dos teores de carbono total (C) e nitrogênio total (N) foi utilizado o método de combustão a seco (Nelson e Sommers, 1986) em aparelho Elementar Vario MAX CN.

Foram determinados por meio dos métodos recomendados pela Embrapa Solos (1997) os seguintes parâmetros químicos: pH em H₂O e KCl, ΔpH, P disponível, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Fe, Mn, Zn, B, Al³⁺, H+Al.

O pH do solo foi determinado em água, adicionando-se 10g de solo para 25ml de água, agitando-se a solução com bastão de vidro e posteriormente colocando-a em repouso durante 1 hora, antes da leitura em potenciômetro com eletrodo combinado. O pH em KCl foi determinado adicionando 1,86g de KCl, agitando-se a solução e aguardando repouso de dez minutos antes de nova leitura. O ΔpH foi calculado pela diferença do pH em KCl e pH em H₂O. Os cátions trocáveis Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ foram extraídos através do método KCl 1N. Os cátions Ca²⁺ e Mg²⁺ foram determinados por absorção atômica, e o Al³⁺ foi determinado através da titulação com NaOH. O P disponível, K⁺, Zn, Mn e Fe foram extraídos com duplo ácido (0,0125M H₂SO₄ + 0,05M HCl). O P disponível foi determinado por fotometria, e os demais elementos determinados por absorção atômica. O B foi extraído através do método da água quente, e determinado com método da azometina-H em fotômetro, conforme

recomendações da Embrapa (2006). O H+Al, ou acidez potencial, foi extraído através do método do acetato de cálcio tamponado a pH 7,0 e determinado volumetricamente com solução de NaOH em presença de fenolftaleína como indicador.

A partir dos resultados obtidos nas análises químicas e físicas, foram calculados os parâmetros: soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions efetiva (t), capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m), teor de atividade da argila (Tr) e teor de matéria orgânica (MO). Os cálculos foram efetuados através das seguintes fórmulas:

$$\mathbf{SB} \text{ (cmolc/kg)} = \mathbf{K}^+ + \mathbf{Ca}^{+2} + \mathbf{Mg}^{+2}$$

$$\mathbf{t} \text{ (cmolc/kg)} = \mathbf{K}^+ + \mathbf{Ca}^{+2} + \mathbf{Mg}^{+2} + \mathbf{Al}^{3+}$$

$$\mathbf{T} \text{ (cmolc/kg)} = \mathbf{K}^+ + \mathbf{Ca}^{+2} + \mathbf{Mg}^{+2} + (\mathbf{Al}+\mathbf{H})$$

$$\mathbf{V} \text{ (\%)} = (\mathbf{SB} \times 100) / \mathbf{T}$$

$$\mathbf{m} \text{ (\%)} = (\mathbf{Al}^{3+} \times 100) / \mathbf{t}$$

$$\mathbf{Tr} \text{ (\%)} = (\mathbf{T} \times 100) / \% \text{ argila}$$

$$\mathbf{MO} = \mathbf{C} \times 1,72$$

2.2.8. Cálculos dos Estoques de C e N

Os estoques de carbono e nitrogênio foram calculados com base nos teores obtidos por combustão a seco pela média da densidade aparente do solo, a partir de três repetições. Os cálculos dos parâmetros foram efetuados através das seguintes fórmulas, segundo recomendações de Arevalo (2002):

$$\mathbf{Peso \ do \ Volume \ do \ Solo} \text{ (t/ha)} = \mathbf{DA} \times \mathbf{Ec} \times 10000$$

$$\mathbf{DA} = \text{Média da Densidade aparente}$$

$$\mathbf{Ec} = \text{Espessura da camada}$$

$$\mathbf{Estoque \ de \ Carbono} \text{ (t/ha)} = (\mathbf{PVs} \times \mathbf{C})/100$$

$$\mathbf{PVs} = \text{Peso do volume do solo}$$

$$\mathbf{C} \text{ (\%)} = \text{Teor de Carbono}$$

$$\text{Estoque de Nitrogênio (t/ha)} = (\text{PVs} \times \text{N})/100$$

PVs = Peso do volume do solo

N (%) = Teor de Nitrogênio

Os estoques acumulados para um metro de solo foram obtidos através da soma dos estoques determinados para cada camada no perfil.

2.2.9. Análises Estatísticas

Os parâmetros observados foram organizados em planilha eletrônica com o software Microsoft Excel versão 2010 e submetidos a análises estatísticas no software StatSoft Statistica versão 10.

Primeiramente foram realizadas análises estatísticas descritivas básicas, tais como média, mediana, mínimo, máximo e desvio padrão. Posteriormente, as variáveis relacionadas aos atributos químicos foram estandardizadas e foi efetuada análise de componentes principais e agrupamento de cluster por médias-K. Por fim foram realizadas análises de regressão linear, onde foram observados o coeficiente angular e o ajuste linear.

Em seguida, com o objetivo de avaliar se as médias variaram significativamente entre as categorias de espessura do horizonte A antrópico foram realizados os seguintes procedimentos estatísticos: verificação de pressupostos de normalidade com o teste de Korgomorv-Smirnov, indicado para séries contínuas; teste de homocedasticidade, através da análise de resíduos por grupo; teste F da tabela de análise de variância (ANOVA); e finalmente, teste de diferença mínima significativa de Fisher (Least Significant Difference – Fisher) a $p < 0,05$, indicado para séries com $n < 20$.

O delineamento amostral utilizado determina que cada sítio, ou transecto, seja tratado como um espaço amostral isolado, devido à heterogeneidade no histórico das deposições antrópicas pré-colombianas. O teste 1, conforme apresentado nas tabelas, compara médias na mesma camada, considerando as glebas de espessura do horizonte A antrópico como tratamentos e as parcelas como repetições.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Classificação dos sítios

Segundo a *Legenda de Classificação Arqueoantropedológica*, ou LCA (Kämpf, 2010), os sítios estudados foram classificados como: (1) Arqueoantrossolo Ágrico cinzento, dístrico; (2) Arqueoantrossolo Proto-Hórtico ebânico, mesotrófico; (3) Arqueoantrossolo Hórtico ebânico, êutrico.

2.3.2. Atributos físicos

Os resultados obtidos para os teores das frações argila, silte e areia estão apresentados na Tabela 1. Os teores de argila apresentaram médias significativamente inferiores apenas para a camada 0-10cm do sítio 1. Nas demais camadas não houve variação significativa. Por outro lado os teores de areia foram significativamente superiores em todo o perfil de Arqueoantrossolo Ágrico e em parte dos perfis de Arqueoantrossolo Hórtico, e Proto-Hórtico. Segundo diversos autores (Ulery *et al.*, 1996; Ketterings e Bigham, 2000; Teixeira e Martins, 2003; Teixeira *et al.*, 2010) estes resultados estão relacionados ao uso intensivo do fogo associado à disponibilidade de material orgânico, formando microagregados organo-minerais do tamanho da fração areia bastante estáveis. Cabe ressaltar os teores médios significativamente inferiores de silte em parte do perfil de Arqueoantrossolo Ágrico, possivelmente retido nos microagregados organo-minerais.

A densidade aparente do solo não variou significativamente nos sítios de Arqueoantrossolo Hórtico e Proto-Hórtico, conforme apresentado na Tabela 2, porém foram encontradas médias significativamente inferiores nas camadas 10-20cm e 20-50cm da Arqueoantrossolo Ágrico. Possivelmente os coeficientes de variação elevados encontrados nos Latossolos adjacentes, em alguns casos superando 20%, contribuíram para a não diferenciação das médias. Tal resultado concorda parcialmente com Neves Junior (2008), que encontrou médias significativamente inferiores em Arqueoantrossolos, tanto para Latossolos, quanto para Argissolos.

Os resultados obtidos para densidade da partícula estão apresentados na Tabela 2. A densidade da partícula não apresentou variações significativas na Arqueoantrossolo Hórtico. No entanto, foram verificadas médias significativamente inferiores para as camadas 10-20cm

da Arqueoantrossolo Ágrico, e 50-100cm da Arqueoantrossolo Proto-Hórtico. A variação encontrada está relacionada à presença de componentes mais leves na matriz do solo, sobretudo matéria orgânica carbonizada.

A porosidade total apresentou médias mais elevadas para as camadas 10-20cm e 20-50cm na Arqueoantrossolo Ágrico, conforme apresentado na Tabela 2. Os resultados indicam para um provável favorecimento do desenvolvimento radicular, corroborando com as observações de Junqueira (2008) sobre relatos de bom desenvolvimento de plantios de mandioca em Arqueoantrossolo Ágrico.

Tabela 1. Médias, desvio padrão e teste de médias para frações granulométricas.

Camada	Argila (%)			Silte (%)			Areia (%)		
	média	desv	t1	média	desv	t1	média	desv	t1
Sítio 1. Arqueoantrossolo Ágrico									
Esp H _z A ≥ 60cm									
0-10	15,00 ± 3,61		B	3,48 ± 2,71		n.s.	81,52 ± 6,18		A
10-20	14,33 ± 4,51		n.s.	3,95 ± 3,82		B	81,72 ± 4,98		A
20-50	19,00 ± 2,65		n.s.	5,40 ± 4,13		B	75,60 ± 1,94		A
50-100	15,00 ± 10,54		n.s.	10,51 ± 12,80		n.s.	74,49 ± 4,83		A
Esp H _z A < 60cm; ≥ 20cm									
0-10	12,33 ± 3,21		B	3,83 ± 4,57		n.s.	83,84 ± 0,15		A
10-20	17,33 ± 0,58		n.s.	2,76 ± 13,77		B	79,91 ± 0,36		A
20-50	15,67 ± 3,06		n.s.	3,93 ± 3,00		B	80,40 ± 2,33		A
50-100	22,33 ± 2,31		n.s.	2,64 ± 12,24		n.s.	75,03 ± 0,24		A
Esp H _z A < 20cm (solo adjacente)									
0-10	27,67 ± 4,51		A	10,90 ± 3,07		n.s.	61,44 ± 4,54		B
10-20	18,00 ± 7,00		n.s.	23,73 ± 0,73		A	63,27 ± 7,23		B
20-50	24,67 ± 8,74		n.s.	13,80 ± 1,79		A	61,53 ± 5,74		B
50-100	28,33 ± 15,14		n.s.	13,04 ± 2,16		n.s.	58,63 ± 4,24		B
Sítio 2. Arqueoantrossolo Próto-Hórtico									
Esp H _z A ≥ 60cm									
0-10	18,33 ± 11,59		n.s.	12,84 ± 12,73		n.s.	68,83 ± 1,44		n.s.
10-20	17,00 ± 11,27		n.s.	20,65 ± 6,86		n.s.	62,35 ± 10,68		n.s.
20-50	17,67 ± 13,05		n.s.	20,87 ± 14,78		n.s.	61,46 ± 2,26		A
50-100	21,33 ± 16,77		n.s.	16,10 ± 17,33		n.s.	62,56 ± 1,21		A
Esp H _z A < 60cm; ≥ 20cm									
0-10	12,00 ± 7,55		n.s.	14,13 ± 7,40		n.s.	73,87 ± 5,03		n.s.
10-20	17,00 ± 11,36		n.s.	10,31 ± 12,69		n.s.	72,69 ± 2,16		n.s.
20-50	19,67 ± 8,39		n.s.	9,70 ± 11,80		n.s.	70,63 ± 4,05		A
50-100	17,00 ± 7,94		n.s.	12,04 ± 12,80		n.s.	70,96 ± 5,02		A
Esp H _z A < 20cm (solo adjacente)									
0-10	22,33 ± 12,50		n.s.	14,58 ± 11,83		n.s.	63,09 ± 11,35		n.s.
10-20	23,33 ± 12,06		n.s.	15,32 ± 9,59		n.s.	61,35 ± 14,17		n.s.
20-50	31,00 ± 12,12		n.s.	19,07 ± 7,16		n.s.	49,93 ± 8,06		B
50-100	33,33 ± 7,77		n.s.	24,84 ± 6,83		n.s.	41,82 ± 11,32		B
Sítio 3. Arqueoantrossolo Hórtico									
Esp H _z A ≥ 60cm									
0-10	20,33 ± 4,16		n.s.	12,54 ± 5,64		n.s.	67,13 ± 1,54		n.s.
10-20	19,33 ± 4,04		n.s.	14,68 ± 5,56		n.s.	65,99 ± 2,06		n.s.
20-50	25,00 ± 4,58		n.s.	7,66 ± 1,86		B	67,34 ± 3,71		n.s.
50-100	30,67 ± 9,61		n.s.	9,07 ± 7,73		n.s.	60,27 ± 1,88		n.s.
Esp H _z A < 60cm; ≥ 20cm									
0-10	25,33 ± 4,04		n.s.	15,87 ± 6,49		n.s.	58,80 ± 4,03		n.s.
10-20	23,00 ± 7,00		n.s.	20,93 ± 4,27		n.s.	56,07 ± 9,54		n.s.
20-50	25,33 ± 7,09		n.s.	19,96 ± 4,01		A	54,71 ± 3,91		n.s.
50-100	33,67 ± 8,08		n.s.	15,82 ± 4,28		n.s.	50,51 ± 8,20		n.s.
Esp H _z A < 20cm (solo adjacente)									
0-10	22,67 ± 0,58		n.s.	29,28 ± 13,14		n.s.	48,06 ± 13,06		n.s.
10-20	25,00 ± 3,61		n.s.	27,29 ± 6,56		n.s.	47,71 ± 9,89		n.s.
20-50	31,67 ± 7,77		n.s.	25,20 ± 4,03		A	43,13 ± 10,24		n.s.
50-100	38,33 ± 11,59		n.s.	17,46 ± 7,32		n.s.	44,20 ± 16,28		n.s.

Tabela 2. Médias, desvio padrão e teste de médias para densidade aparente, densidade da partícula e porosidade total.

Camada	Densidade (g/cm ³)			Densidade da partícula (g/cm ³)			Porosidade Total (%)		
	Média	desv	t1	média	desv	t1	média	desv	t1
Sítio 1. Arqueoantrossolo Ágrico									
Esp HzA ≥ 60cm									
0-10	1,54 ± 0,09		n.s.	2,54 ± 0,05		n.s.	37,77 ± 4,57		n.s.
10-20	1,39 ± 0,14		B	2,47 ± 0,03		B	44,33 ± 5,79		A
20-50	1,75 ± 0,08		AB	2,49 ± 0,01		n.s.	30,35 ± 2,66		AB
50-100	1,69 ± 0,13		n.s.	2,51 ± 0,03		n.s.	33,24 ± 3,99		n.s.
Esp HzA < 60cm; ≥ 20cm									
0-10	1,45 ± 0,09		n.s.	2,51 ± 0,02		n.s.	42,34 ± 3,55		n.s.
10-20	1,72 ± 0,06		A	2,53 ± 0,02		A	31,96 ± 1,90		B
20-50	1,64 ± 0,05		B	2,53 ± 0,02		n.s.	35,10 ± 2,19		A
50-100	1,61 ± 0,23		n.s.	2,53 ± 0,02		n.s.	36,12 ± 8,81		n.s.
Esp HzA < 20cm (solo adjacente)									
0-10	1,55 ± 0,22		n.s.	2,54 ± 0,03		n.s.	38,92 ± 9,07		n.s.
10-20	1,80 ± 0,18		A	2,55 ± 0,02		A	29,45 ± 6,73		B
20-50	1,96 ± 0,17		A	2,54 ± 0,03		n.s.	23,00 ± 6,17		B
50-100	1,79 ± 0,08		n.s.	2,55 ± 0,02		n.s.	30,02 ± 3,66		n.s.
Sítio 2. Arqueoantrossolo Próto-Hórtica									
Esp HzA ≥ 60cm									
0-10	1,41 ± 0,19		n.s.	2,44 ± 0,04		n.s.	42,13 ± 6,93		n.s.
10-20	1,61 ± 0,15		n.s.	2,43 ± 0,09		n.s.	33,65 ± 8,38		n.s.
20-50	1,88 ± 0,20		n.s.	2,45 ± 0,04		n.s.	23,17 ± 8,34		B
50-100	1,72 ± 0,06		n.s.	2,48 ± 0,02		B	30,55 ± 2,03		n.s.
Esp HzA < 60cm; ≥ 20cm									
0-10	1,47 ± 0,15		n.s.	2,38 ± 0,07		n.s.	38,01 ± 7,42		n.s.
10-20	1,54 ± 0,06		n.s.	2,46 ± 0,07		n.s.	37,51 ± 0,61		n.s.
20-50	1,89 ± 0,09		n.s.	2,45 ± 0,01		n.s.	22,80 ± 3,62		B
50-100	1,68 ± 0,09		n.s.	2,44 ± 0,06		B	31,25 ± 3,82		n.s.
Esp HzA < 20cm (solo adjacente)									
0-10	1,48 ± 0,15		n.s.	2,43 ± 0,06		n.s.	39,00 ± 6,94		n.s.
10-20	1,54 ± 0,10		n.s.	2,43 ± 0,12		n.s.	36,65 ± 2,74		n.s.
20-50	1,57 ± 0,13		n.s.	2,51 ± 0,06		n.s.	37,57 ± 3,90		A
50-100	1,60 ± 0,34		n.s.	2,56 ± 0,03		A	37,78 ± 12,86		n.s.
Sítio 3. Arqueoantrossolo Hórtica									
Esp HzA ≥ 60cm									
0-10	1,32 ± 0,21		n.s.	2,44 ± 0,01		n.s.	46,14 ± 8,38		n.s.
10-20	1,55 ± 0,12		n.s.	2,46 ± 0,04		n.s.	36,94 ± 4,19		n.s.
20-50	1,69 ± 0,09		n.s.	2,50 ± 0,01		n.s.	32,31 ± 3,77		n.s.
50-100	1,69 ± 0,15		n.s.	2,51 ± 0,01		n.s.	32,69 ± 6,12		n.s.
Esp HzA < 60cm; ≥ 20cm									
0-10	1,37 ± 0,08		n.s.	2,48 ± 0,03		n.s.	44,97 ± 3,50		n.s.
10-20	1,42 ± 0,08		n.s.	2,50 ± 0,04		n.s.	43,29 ± 4,02		n.s.
20-50	1,54 ± 0,19		n.s.	2,50 ± 0,04		n.s.	38,09 ± 8,15		n.s.
50-100	1,59 ± 0,15		n.s.	2,53 ± 0,02		n.s.	36,98 ± 5,35		n.s.
Esp HzA < 20cm (solo adjacente)									
0-10	1,43 ± 0,14		n.s.	2,69 ± 0,39		n.s.	46,54 ± 3,16		n.s.
10-20	1,47 ± 0,16		n.s.	2,49 ± 0,04		n.s.	40,75 ± 6,09		n.s.
20-50	1,49 ± 0,05		n.s.	2,47 ± 0,08		n.s.	39,70 ± 2,34		n.s.
50-100	1,42 ± 0,29		n.s.	2,52 ± 0,02		n.s.	43,49 ± 11,68		n.s.

2.3.3. Carbono, Nitrogênio e C:N.

Os resultados obtidos para carbono total estão apresentados na Tabela 3. O Arqueoantrossolo Hórtica apresentou teores mais elevados de carbono para todas as camadas na gleba mais espessa quando comparada a gleba menos espessa e ao solo adjacente. Enquanto na Arqueoantrossolo Proto-Hórtica e na Arqueoantrossolo Agrícola foram encontradas diferenças significativas apenas para as camadas subsuperficiais. Por um lado, Kämpf e Kern (2005) em estudos na mesma região relatam teores médios para a Arqueoantrossolo de 38,9 Cmg/Kg nas camadas superficiais, um pouco superiores aos encontrados nos sítios estudados. Por outro lado, os teores significativamente superiores de carbono na Arqueoantrossolo Agrícola sem apresentar índices elevados dos macro e micronutrientes concordam com os resultados apresentados por Denevan (2010).

Os resultados obtidos para nitrogênio total estão apresentados na Tabela 3. No Arqueoantrossolo Hórtica os teores de nitrogênio foram mais elevados quando comparados aos solos adjacentes nas camadas superficiais, enquanto na Arqueoantrossolo Agrícola as médias foram superiores aos solos adjacentes nas camadas subsuperficiais. Os resultados concordaram com os altos teores de N-total encontrados em Terras Pretas por Lehmann (2003).

Os resultados obtidos para a relação C:N estão apresentados na Tabela 3. Nas camadas subsuperficiais da Arqueoantrossolo Hórtica e da Arqueoantrossolo Proto-Hórtica a relação C:N foi significativamente superior ao solo adjacente. Possivelmente este comportamento é determinado pela intensa deposição de material orgânico carbonizado, rico em carbono resistente a degradação microbiana (Madari *et al.*, 2010) e de elevada densidade de cargas por unidade de área e superfície específica (Liang *et al.* 2006). O teor de atividade da fração argila para tais camadas corrobora com esta afirmação, como demonstra a Figura 3, denotando uma maior quantidade de carga por unidade de carbono em subsuperfície.

Na Arqueoantrossolo Agrícola a relação C:N não apresentou variações significativas comparada ao solo adjacente, permanecendo na faixa de 11 a 15. As variações do nitrogênio total em função do carbono total em Arqueoantrossolo Agrícola estão apresentadas na Figura 4. Neste caso os coeficientes de determinação indicam para uma forte correlação entre as variáveis em todas as camadas e os coeficientes angulares foram semelhantes. Possivelmente, a relativa menor concentração de carbono pirogênico nas Terras Mulatas (Arroyo-Kallin, 2012), em oposição ao carbono contido na biomassa microbiana e nas frações de húmicas, explique esta não diferenciação em subsuperfície.

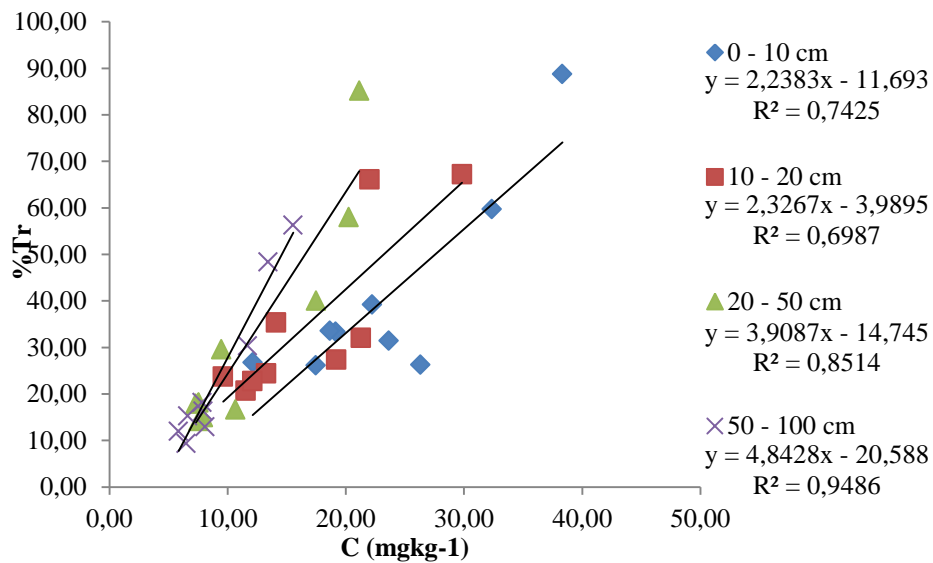


Figura 3. Análise de regressão para teor de atividade da fração argila em função do teor de carbono total no sítio Arqueoantrossolo Hórtica.

Por outro lado, relações C:N elevadas podem ocasionar indisponibilidade de N mineral, pela imobilização deste elemento na biomassa da microbiota do solo. Esta observação corrobora com as conclusões de Lehmann (2003) a respeito da baixa disponibilidade de N foliar em cultivos de feijão-caupí em Arqueoantrossolo.

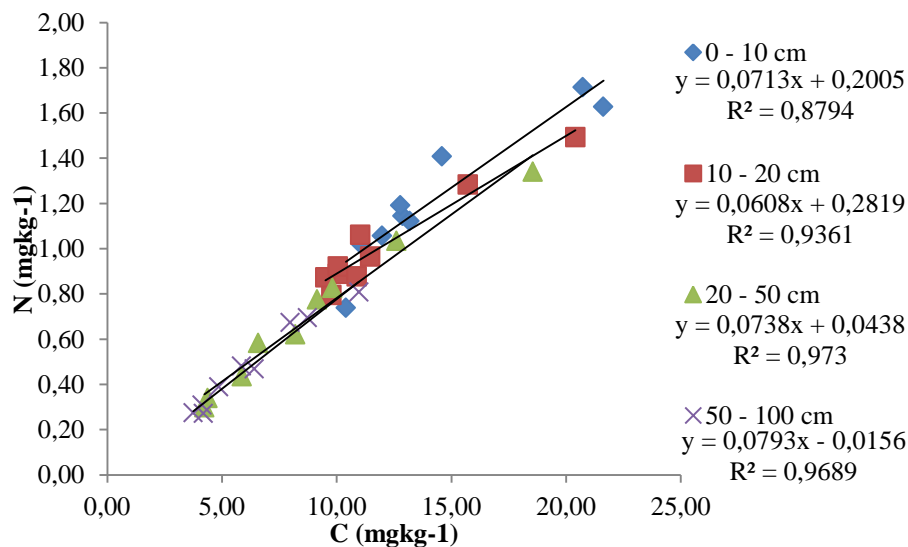


Figura 4. Análise de regressão para teor de N total em função do teor de C total no sítio Arqueoantrossolo Ágrico.

Visto que relações C:N elevadas resultam em condições diferenciadas para a microbiota do solo (Brady e Weil, 2013), esses resultados nos levam a discordar de Fraser *et al.* (2011) quando este sugere que os termos Terra Mulata (Arqueoantrossolo Ágrico) e Terra

Preta (Arqueoantrossolo Hórtico) sejam utilizados simplesmente para descrever direções ao longo de um gradiente de fertilidade.

Tabela 3. Médias, desvio padrão e teste de médias para teor de carbono, teor de nitrogênio e relação C:N.

camada	C (mg/Kg)			N (mg/Kg)			C:N		
	média	Desv	t1	média	desv	t1	média	desv	t1
Sítio 1. Arqueoantrossolo Ágrico									
Esp HzA ≥ 60cm									
0-10	18,11 ± 5,33	n.s.		1,47 ± 0,36	n.s.		12,24 ± 0,98	n.s.	
10-20	15,87 ± 4,47	n.s.		1,25 ± 0,27	n.s.		12,60 ± 0,94	n.s.	
20-50	13,66 ± 4,46	A		1,07 ± 0,26	A		12,64 ± 1,06	n.s.	
50-100	9,23 ± 1,56	A		0,73 ± 0,07	A		12,66 ± 0,87	n.s.	
Esp HzA < 60cm; ≥ 20cm									
0-10	12,94 ± 0,21	n.s.		1,15 ± 0,04	n.s.		11,24 ± 0,51	n.s.	
10-20	10,15 ± 0,69	n.s.		0,89 ± 0,03	n.s.		11,40 ± 0,85	n.s.	
20-50	7,98 ± 1,30	B		0,66 ± 0,10	B		12,10 ± 0,99	n.s.	
50-100	5,71 ± 0,78	B		0,45 ± 0,05	B		12,79 ± 0,80	n.s.	
Esp HzA < 20cm (solo adjacente)									
0-10	12,03 ± 2,25	n.s.		1,06 ± 0,34	n.s.		11,78 ± 2,01	n.s.	
10-20	10,29 ± 0,66	n.s.		0,92 ± 0,13	n.s.		11,33 ± 0,95	n.s.	
20-50	4,83 ± 0,91	B		0,36 ± 0,07	B		13,52 ± 0,66	n.s.	
50-100	4,03 ± 0,24	B		0,29 ± 0,02	C		14,16 ± 1,10	n.s.	
Sítio 2. Arqueoantrossolo Proto-Hórtica									
Esp HzA ≥ 60cm									
0-10	27,74 ± 3,00	n.s.		2,21 ± 0,13	n.s.		12,53 ± 0,62	n.s.	
10-20	20,72 ± 1,67	n.s.		1,51 ± 0,14	n.s.		13,76 ± 1,32	A	
20-50	14,33 ± 1,80	A		0,85 ± 0,09	n.s.		16,86 ± 1,60	A	
50-100	11,78 ± 0,17	A		0,66 ± 0,03	n.s.		17,80 ± 0,83	A	
Esp HzA < 60cm; ≥ 20cm									
0-10	19,75 ± 1,60	n.s.		1,76 ± 0,10	n.s.		11,21 ± 0,35	n.s.	
10-20	14,05 ± 1,52	n.s.		1,19 ± 0,13	n.s.		11,77 ± 0,25	B	
20-50	8,11 ± 2,57	B		0,66 ± 0,24	n.s.		12,63 ± 1,58	B	
50-100	6,33 ± 1,45	B		0,50 ± 0,13	n.s.		12,68 ± 1,16	B	
Esp HzA < 20cm (solo adjacente)									
0-10	20,63 ± 7,25	n.s.		1,88 ± 0,64	n.s.		11,00 ± 1,02	n.s.	
10-20	14,43 ± 4,70	n.s.		1,30 ± 0,42	n.s.		11,16 ± 1,06	B	
20-50	8,57 ± 2,80	B		0,82 ± 0,34	n.s.		10,80 ± 1,16	B	
50-100	6,62 ± 2,20	B		0,66 ± 0,28	n.s.		10,40 ± 1,19	C	
Sítio 3. Arqueoantrossolo Hórtica									
Esp HzA ≥ 60cm									
0-10	32,34 ± 6,00	A		2,28 ± 0,33	A		14,12 ± 0,59	n.s.	
10-20	24,37 ± 4,74	A		1,56 ± 0,21	A		15,58 ± 0,91	n.s.	
20-50	19,63 ± 1,90	A		0,84 ± 0,10	n.s.		23,40 ± 0,61	A	
50-100	13,56 ± 1,93	A		0,62 ± 0,08	n.s.		21,91 ± 0,26	A	
Esp HzA < 60cm; ≥ 20cm									
0-10	19,33 ± 6,28	B		1,57 ± 0,48	B		12,28 ± 0,60	n.s.	
10-20	14,31 ± 4,79	B		1,07 ± 0,37	AB		13,33 ± 0,98	n.s.	
20-50	9,16 ± 1,70	B		0,69 ± 0,15	n.s.		13,45 ± 1,59	B	
50-100	7,52 ± 0,79	B		0,56 ± 0,07	n.s.		13,40 ± 1,55	B	
Esp HzA < 20cm (solo adjacente)									
0-10	18,43 ± 0,86	B		1,34 ± 0,07	B		13,77 ± 0,49	n.s.	
10-20	12,30 ± 0,89	B		0,92 ± 0,06	B		13,48 ± 1,44	n.s.	
20-50	7,68 ± 0,21	B		0,59 ± 0,06	n.s.		13,18 ± 1,28	B	
50-100	6,76 ± 1,06	B		0,53 ± 0,04	n.s.		12,81 ± 1,61	B	

Os resultados obtidos para estoque de carbono estão apresentados na Tabela 4. No Arqueoantrossolo Ágrico o estoque de carbono apresentou médias significativamente superiores nas camadas subsuperficiais. Já nas Terras Pretas o estoque de carbono foi superior em todas as camadas, exceto na camada mais superficial na Arqueoantrossolo Proto-Hortica. Neste caso o coeficiente de variação muito elevado, 41%, nas parcelas em solo adjacente foi o responsável pela não diferenciação das médias.

Tabela 4. Médias, desvio padrão e teste de médias para estoque de carbono ($t\ C\ ha^{-1}$).

camada	média	desv	máx	t1	média	desv	máx	t1	média	desv	máx	t1
Sítio 1. Arqueoantrossolo Ágrico												
	Esp HzA \geq 60cm				Esp HzA < 60cm; \geq 20cm				Esp HzA < 20cm			
0-10	27,85	± 8,58	36,86	n.s.	18,76	± 1,29	19,58	n.s.	18,60	± 4,65	23,93	n.s.
10-20	29,05	± 11,00	40,50	n.s.	17,47	± 1,64	18,91	n.s.	14,30	± 2,32	16,79	n.s.
20-50	79,44	± 23,66	106,59	A	39,27	± 6,14	43,88	B	25,34	± 4,67	30,47	B
50-100	82,99	± 18,07	103,54	A	45,80	± 6,46	52,84	B	34,04	± 2,77	37,15	B
Sítio 2. Arqueoantrossolo Próto-Hortica												
	Esp HzA \geq 60cm				Esp HzA < 60cm; \geq 20cm				Esp HzA < 20cm			
0-10	38,81	± 1,97	41,09	n.s.	29,12	± 3,38	31,65	n.s.	30,98	± 13,36	45,64	n.s.
10-20	32,74	± 4,19	36,47	A	21,96	± 1,81	23,58	B	21,97	± 6,57	28,37	B
20-50	79,82	± 9,99	90,44	A	47,48	± 19,48	69,02	B	39,59	± 10,05	47,98	B
50-100	101,51	± 0,66	101,98	A	53,53	± 15,48	71,33	B	50,39	± 5,66	54,94	B
Sítio 3. Arqueoantrossolo Hortica												
	Esp HzA \geq 60cm				Esp HzA < 60cm; \geq 20cm				Esp HzA < 20cm			
0-10	41,90	± 5,24	47,46	A	26,55	± 9,40	34,38	B	26,28	± 1,25	27,64	B
10-20	37,49	± 4,04	42,15	A	20,52	± 7,98	28,89	B	18,15	± 2,51	20,68	B
20-50	99,61	± 10,84	111,61	A	42,06	± 6,48	48,13	B	34,21	± 0,52	34,78	B
50-100	114,36	± 18,79	135,95	A	60,03	± 10,00	68,93	B	49,00	± 17,89	69,52	B

Os resultados obtidos para o estoque de carbono em um metro de solo estão apresentados na Figura 5. Os três sítios obtiveram médias significativamente superiores na gleba mais espessa quando comparadas a gleba menos espessa e ao solo adjacente. Os valores nas Terras Pretas variaram entre 266 e 330 $t\ C\ ha^{-1}$, enquanto na Arqueoantrossolo Ágrico variou entre 171 e 287 $t\ C\ ha^{-1}$. Os valores foram superiores aos encontrados por Mendoza (2009), em estudo comparando solos antrópicos e adjacentes sob floresta secundária, cujas médias não variaram significativamente, possivelmente em razão do histórico de uso do solo, segundo o próprio autor.

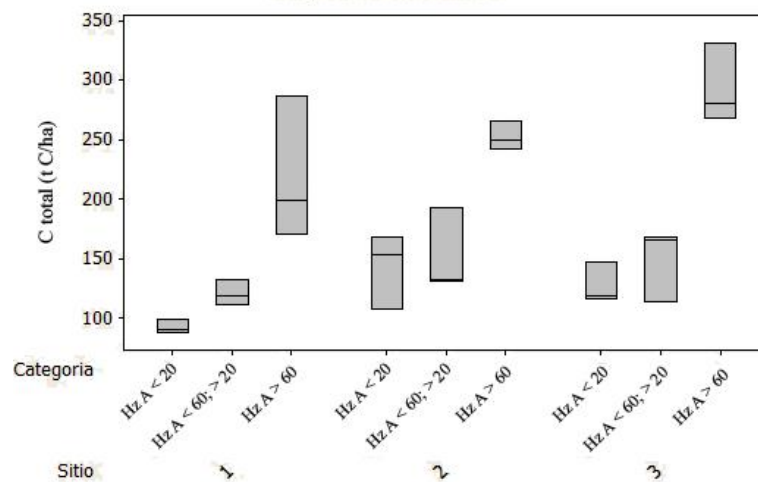


Figura 5. Médias para estoque de carbono total em 1 metro de solo.

A divisão por glebas em função da espessura do horizonte A antrópico, segundo critérios da legenda de classificação arqueoantropedológica (LCA), tendeu a diferenciar a gleba mais espessa em oposição a gleba menos espessa e ao solo adjacente imediato quanto aos estoques de C nos três sítios. Esta observação indica que nos modelos antropogênicos “lixreira” e “agrícola”, responsáveis pela formação de Terras Pretas e Terras Mulatas respectivamente, o processo de acúmulo intenso de carbono pirogênico apresenta um comportamento espacial associado a núcleos de deposição, concordando com diversos autores (Sombroek, 1966; Kern e Kämpf, 1989; Woods, 2010).

Os resultados obtidos para o estoque de nitrogênio em um metro de solo estão apresentados na Figura 6. Considerando o acumulado em um metro de solo a Arqueoantrossolo Ágrico e a Arqueoantrossolo Hórtica obtiveram médias significativamente superiores na gleba mais espessa, quando comparadas a gleba menos espessa e ao solo adjacente.

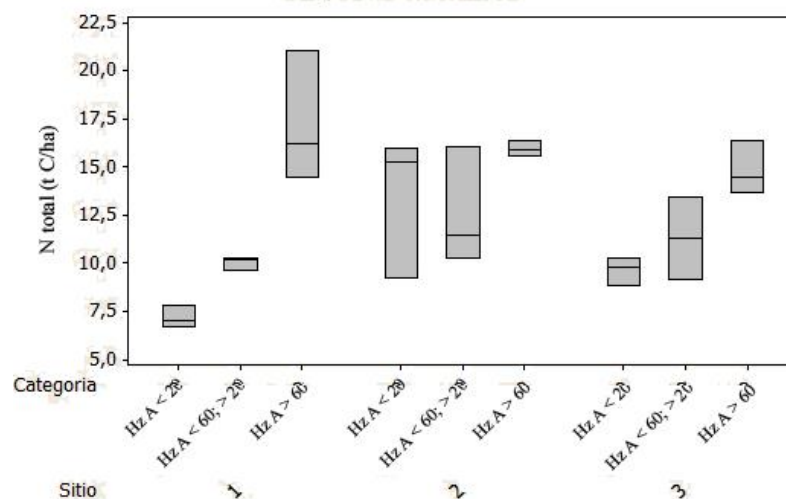


Figura 6. Médias para estoque de nitrogênio total em 1 metro de solo.

Os resultados obtidos para estoque de nitrogênio, por camada, estão apresentados na Tabela 5. O estoque de nitrogênio segue a mesma tendência de diferenciação que o estoque de carbono na Terra Mulata. Na Arqueoantrossolo Hórtica o estoque de nitrogênio foi superior quando comparada ao solo adjacente nas camadas 10-20cm e 20-50cm.

Tabela 5. Médias, desvio padrão e teste de médias para estoque de nitrogênio ($t\ N\ ha^{-1}$).

camada	Média	desv	Máx	t1	média	desv	máx	t1	média	desv	máx	t1
Sítio 1. Arqueoantrossolo Ágrico												
	Esp HzA \geq 60cm				Esp HzA < 60cm; \geq 20cm				Esp HzA < 20cm			
0-10	2,25	\pm 0,52	2,77	n.s.	1,67	\pm 0,07	1,74	n.s.	1,64	\pm 0,62	2,31	n.s.
10-20	2,27	\pm 0,70	2,96	n.s.	1,53	\pm 0,10	1,63	n.s.	1,28	\pm 0,31	1,62	n.s.
20-50	6,21	\pm 1,29	7,70	A	3,24	\pm 0,43	3,72	B	1,88	\pm 0,38	2,26	B
50-100	6,51	\pm 0,97	7,62	A	3,57	\pm 0,28	3,86	B	2,40	\pm 0,02	2,42	C
Sítio 2. Arqueoantrossolo Próto-Hórtica												
	Esp HzA \geq 60cm				Esp HzA < 60cm; \geq 20cm				Esp HzA < 20cm			
0-10	3,11	\pm 0,30	3,43	n.s.	2,60	\pm 0,30	2,88	n.s.	2,81	\pm 1,10	3,90	n.s.
10-20	2,38	\pm 0,16	2,53	n.s.	1,86	\pm 0,12	1,96	n.s.	1,97	\pm 0,56	2,36	n.s.
20-50	4,73	\pm 0,40	5,06	n.s.	3,86	\pm 1,77	5,69	n.s.	3,76	\pm 1,31	5,02	n.s.
50-100	5,71	\pm 0,26	5,93	n.s.	4,26	\pm 1,36	5,81	n.s.	4,92	\pm 1,07	5,86	n.s.
Sítio 3. Arqueoantrossolo Hórtica												
	Esp HzA \geq 60cm				Esp HzA < 60cm; \geq 20cm				Esp HzA < 20cm			
0-10	2,97	\pm 0,35	3,37	A	2,15	\pm 0,74	2,84	B	1,91	\pm 0,12	2,00	B
10-20	2,40	\pm 0,12	2,53	A	1,54	\pm 0,62	2,23	B	1,36	\pm 0,23	1,53	B
20-50	4,27	\pm 0,56	4,87	A	3,13	\pm 0,34	3,45	B	2,61	\pm 0,21	2,81	B
50-100	5,22	\pm 0,84	6,17	A	4,48	\pm 0,50	4,94	B	3,76	\pm 0,89	4,75	B

2.3.4. Acidez e Toxidez por Alumínio

Os resultados obtidos para pH, pH em KCl estão apresentados na Tabela 6. O pH em H_2O não apresentou diferenças significativas em nenhuma das camadas na Arqueoantrossolo Ágrico, e apenas na camada 50-100cm o pH em KCl foi superior em relação ao solo adjacente. Na Arqueoantrossolo Proto-Hórtica o pH em H_2O foi mais elevado para todas as camadas em relação ao solo adjacente, excetuando a camada 10-20cm, e o pH em KCl foi superior apenas nas camadas subsuperficiais. Na gleba mais espessa da Arqueoantrossolo Hórtica o pH em H_2O e KCl foram superiores em todas as camadas. O pH em H_2O e KCl ficou na faixa esperada para os 3 sítios quando comparados a levantamentos realizados em dez sítios de TPI localizados próximos a cidade de Manaus por Falcão (2003), apesar da Arqueoantrossolo Ágrico apresentar acidez mais elevada, semelhante a encontrada no solo

adjacente imediato. A Arqueoantrossolo Hórtica foi um pouco mais básica e a Arqueoantrossolo Proto-Hórtica ligeiramente mais ácida que a média para TPIs (pH 5,6) relatada por Kern *et al.* (2010).

Tabela 6. Médias, desvio padrão e teste de médias para. pH, pH em KCl e Δ pH.

camada	pH			pH em KCl			Δ pH		
	média	desv	t1	média	desv	t1	média	desv	t1
Sítio 1. Arqueoantrossolo Ágrico									
Esp HzA \geq 60cm									
0-10	4,8 \pm 0,7		n.s.	4,4 \pm 0,5		n.s.	-0,5 \pm 0,3		n.s.
10-20	5,0 \pm 0,7		n.s.	4,5 \pm 0,5		n.s.	-0,5 \pm 0,2		n.s.
20-50	5,0 \pm 0,8		n.s.	4,2 \pm 0,7		n.s.	-0,8 \pm 0,0		n.s.
50-100	4,7 \pm 0,4		n.s.	4,2 \pm 0,1		A	-0,6 \pm 0,3		n.s.
Esp HzA < 60cm; \geq 20cm									
0-10	5,0 \pm 0,4		n.s.	4,2 \pm 0,3		n.s.	-0,8 \pm 0,1		n.s.
10-20	4,9 \pm 0,5		n.s.	4,1 \pm 0,4		n.s.	-0,7 \pm 0,1		n.s.
20-50	4,7 \pm 0,3		n.s.	4,0 \pm 0,2		n.s.	-0,8 \pm 0,2		n.s.
50-100	4,7 \pm 0,3		n.s.	4,1 \pm 0,1		AB	-0,7 \pm 0,2		n.s.
Esp HzA < 20cm (solo adjacente)									
0-10	4,3 \pm 0,2		n.s.	3,7 \pm 0,1		n.s.	-0,5 \pm 0,2		n.s.
10-20	4,3 \pm 0,2		n.s.	3,8 \pm 0,1		n.s.	-0,5 \pm 0,2		n.s.
20-50	4,3 \pm 0,2		n.s.	3,8 \pm 0,0		n.s.	-0,5 \pm 0,2		n.s.
50-100	4,4 \pm 0,1		n.s.	3,9 \pm 0,0		B	-0,5 \pm 0,1		n.s.
Sítio 2. Arqueoantrossolo Proto-Hórtica									
Esp HzA \geq 60cm									
0-10	5,5 \pm 0,1		AB	4,8 \pm 0,2		n.s.	-0,8 \pm 0,1		n.s.
10-20	5,6 \pm 0,2		n.s.	4,7 \pm 0,2		n.s.	-0,9 \pm 0,1		n.s.
20-50	5,8 \pm 0,1		A	4,7 \pm 0,2		A	-1,1 \pm 0,2		n.s.
50-100	5,8 \pm 0,1		A	4,6 \pm 0,1		A	-1,1 \pm 0,0		n.s.
Esp HzA < 60cm; \geq 20cm									
0-10	5,5 \pm 0,1		A	4,7 \pm 0,2		n.s.	-0,8 \pm 0,2		n.s.
10-20	5,6 \pm 0,1		n.s.	4,7 \pm 0,0		n.s.	-0,8 \pm 0,1		n.s.
20-50	5,7 \pm 0,2		A	4,6 \pm 0,2		A	-1,1 \pm 0,2		n.s.
50-100	5,6 \pm 0,2		A	4,5 \pm 0,2		A	-1,1 \pm 0,1		n.s.
Esp HzA < 20cm (solo adjacente)									
0-10	5,0 \pm 0,4		B	4,2 \pm 0,4		n.s.	-0,9 \pm 0,1		n.s.
10-20	5,2 \pm 0,5		n.s.	4,2 \pm 0,5		n.s.	-1,0 \pm 0,0		n.s.
20-50	4,8 \pm 0,2		B	3,9 \pm 0,1		B	-1,0 \pm 0,1		n.s.
50-100	4,7 \pm 0,1		B	3,8 \pm 0,1		B	-1,0 \pm 0,1		n.s.
Sítio 3. Arqueoantrossolo Hórtica									
Esp HzA \geq 60cm									
0-10	6,3 \pm 0,2		A	5,5 \pm 0,2		A	-0,8 \pm 0,1		A
10-20	6,2 \pm 0,2		A	5,4 \pm 0,3		A	-0,8 \pm 0,0		n.s.
20-50	6,2 \pm 0,3		A	5,1 \pm 0,4		A	-1,1 \pm 0,1		A
50-100	6,0 \pm 0,1		A	4,9 \pm 0,1		A	-1,2 \pm 0,0		A
Esp HzA < 60cm; \geq 20cm									
0-10	5,1 \pm 0,5		B	4,3 \pm 0,4		B	-0,8 \pm 0,1		A
10-20	5,0 \pm 0,3		B	4,1 \pm 0,1		B	-0,8 \pm 0,2		n.s.
20-50	5,1 \pm 0,1		B	4,1 \pm 0,0		B	-1,0 \pm 0,1		A
50-100	5,1 \pm 0,1		B	4,1 \pm 0,0		B	-1,0 \pm 0,1		AB
Esp HzA < 20cm (solo adjacente)									
0-10	4,3 \pm 0,1		C	3,8 \pm 0,1		C	-0,5 \pm 0,1		B
10-20	4,5 \pm 0,2		B	3,9 \pm 0,1		B	-0,6 \pm 0,1		n.s.
20-50	4,8 \pm 0,3		B	4,1 \pm 0,1		B	-0,7 \pm 0,1		B
50-100	4,7 \pm 0,3		B	4,0 \pm 0,0		B	-0,7 \pm 0,3		B

Os resultados obtidos para Al^{3+} estão apresentados na Figura 7. O Al trocável dos solos adjacentes foi significativamente superior em todas as camadas na Arqueoantrossolo Agrícola e na Arqueoantrossolo Hórtica, e nas camadas subsuperficiais na Arqueoantrossolo Proto-Hórtica.

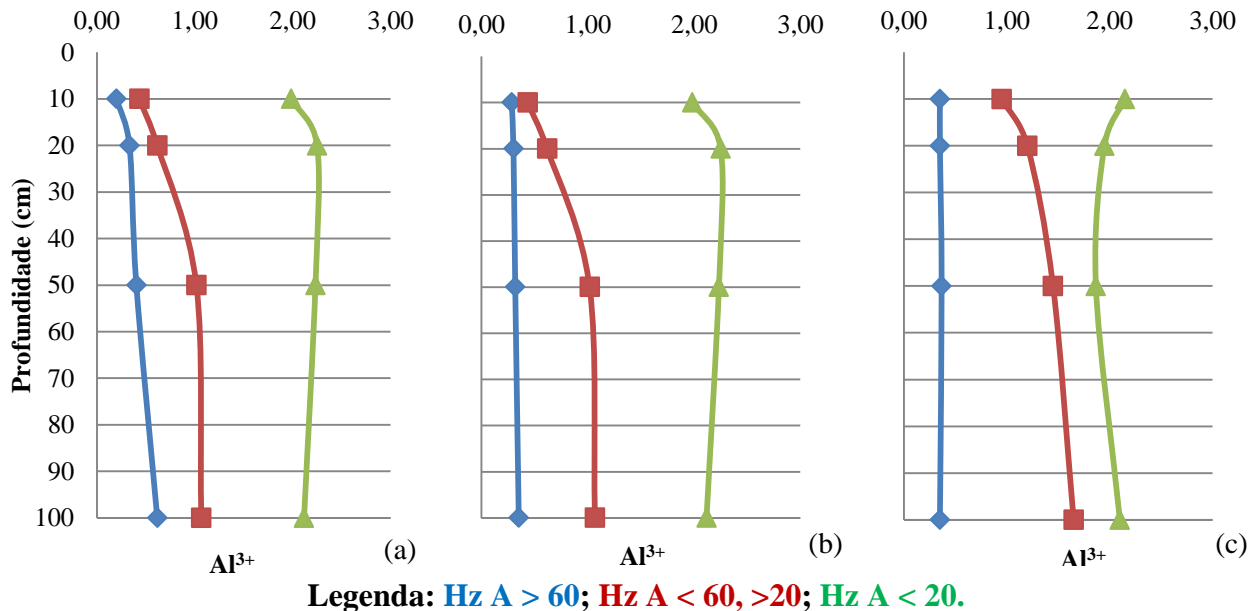


Figura 7. Al trocável (cmolckg^{-1}) em função da profundidade em (a) Terra Mulata, (b) Arqueoantrossolo Proto-Hórtica e (c) Arqueoantrossolo Hórtica.

A relação inversa do Al^{3+} em função do pH em H_2O foi verificada em todas as camadas no sítio de Arqueoantrossolo Hórtica, conforme demonstrado na Figura 8. Esses resultados corroboram com a literatura, que firma que as Terras Pretas não costumam apresentar problemas com toxidez de alumínio (Falcão, 2003).

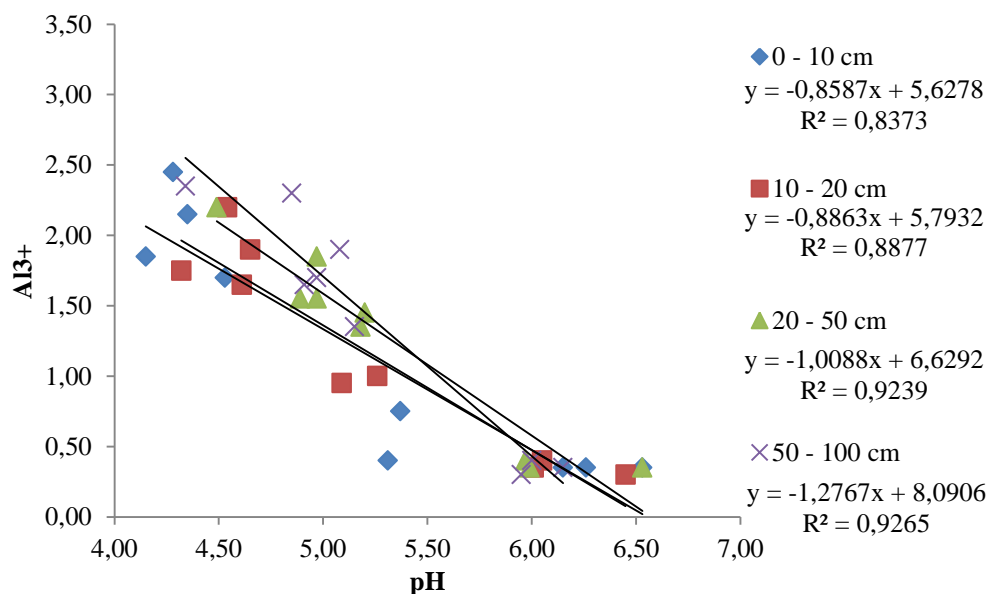


Figura 8. Al trocável em função do pH.

Os resultados obtidos para acidez potencial estão apresentados na Figura 9. A acidez potencial (Al + H) foi superior no solo adjacente, quando comparado a ambas as glebas de Arqueoantrossolo Ágrico para todas as camadas exceto a 20-50cm. Na gleba com o horizonte mais espesso de Arqueoantrossolo Hórtica a acidez potencial foi superior na camada 50-100cm, quando comparada a gleba menos espessa e ao solo adjacente, e apresentou tendência inversa para a camada 0-10cm. Esses resultados são explicados pela alta concentração de íons H^+ , promovendo o tamponamento do pH a níveis intermediários conforme verificado anteriormente, devido aos processos de protonação e desprotonação em sítios de cargas dependentes (Brady e Neil. 2013). Segundo Santos e Camargo (1999), a dissociação de grupos funcionais ácidos presentes na matéria orgânica pode fornecer grande quantidade de íons H^+ .

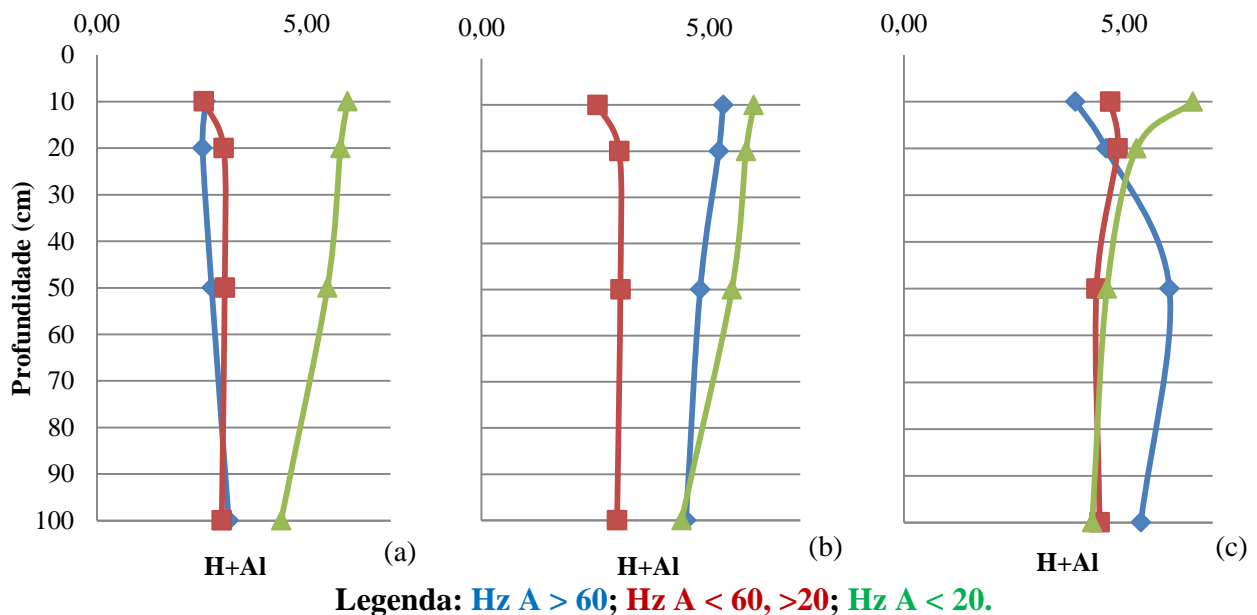


Figura 9. Acidez potencial (cmolckg⁻¹) em função da profundidade em (a) Terra Mulata, (b) Arqueoantrossolo Proto-Hórtica e (c) Arqueoantrossolo Hórtica.

Os resultados obtidos para ΔpH estão apresentados na Tabela 6. A carga líquida (ΔpH) não apresentou diferenças significativas na Arqueoantrossolo Ágrico e na Arqueoantrossolo Proto-Hórtica. No entanto, ambas as glebas da Arqueoantrossolo Hórtica apresentaram médias superiores ao solo adjacente nas camadas 0-10cm, 20-50cm e 50-100cm. Os teores de Al^{3+} e ΔpH foram relacionados inversamente por Falcão (2003). No entanto, efetuando análises de regressão para as quatro camadas do sítio de Arqueoantrossolo Hórtica, foi verificada uma relação direta, onde os menores teores de Al^{3+} foram encontrados nas amostras com menores valores de ΔpH . A análise de regressão não encontrou relação entre os teores

de Fe e ΔpH , sugerindo que os sítios eletronegativos não estão sendo ocupados por óxidos de Fe ou Al^{+3} como seria de se esperar para a maioria dos solos tropicais (Kiehl, 1979; Fasbender, 1982).

2.3.5. Macronutrientes e Micronutrientes

Os resultados obtidos para P disponível estão apresentados na Tabela 7. Na Arqueoantrossolo Ágrico o P disponível foi superior nas camadas subsuperficiais da gleba mais espessa. O P disponível foi superior em todas as camadas na gleba mais espessa das Terras Pretas Hórtica e Proto-Hórtica com médias mais elevadas nas camadas subsuperficiais. Diversos autores relataram teores elevados de P disponível em Terra Preta (Sombroek, 1966; Costa e Kern, 1999; Lehmann *et al.*, 2003a; Falcão *et al.*, 2009; Glaser, 2007;). Kern (1989) encontrou teores semelhantes para as camadas superficiais em Cachoeira-Porteira, também na bacia do Rio Trombetas, todavia, a concentração em camadas subsuperficiais foi superior no caso estudado. Segundo Arroyo-Kalin *et al.* (2012) e McCann *et al.* (2001) as cinzas contribuem com grande parte do aporte de P em Terras Pretas.

Tabela 7. Médias, desvio padrão e teste de médias para P disponível ($mg\ Kg^{-1}$).

camada	Média	desv	máx	t1	média	desv	máx	t1	média	desv	máx	t1
Sítio 1. Arqueoantrossolo Ágrico												
	Esp HzA $\geq 60cm$				Esp HzA $< 60cm; \geq 20cm$				Esp HzA $< 20cm$			
0-10	32,5 \pm 15,1		49,9	n.s.	16,3 \pm 6,6		22,7	n.s.	14,5 \pm 1,9		15,6	n.s.
10-20	41,8 \pm 18,9		61,4	n.s.	18,2 \pm 9,5		26,5	n.s.	13,6 \pm 2,3		16,2	n.s.
20-50	79,4 \pm 20,1		94,2	A	19,5 \pm 9,8		29,0	B	12,3 \pm 1,6		13,9	B
50-100	61,4 \pm 18,9		81,1	A	17,1 \pm 5,9		23,6	B	9,0 \pm 1,6		10,6	B
Sítio 2. Arqueoantrossolo Próto-Hórtica												
	Esp HzA $\geq 60cm$				Esp HzA $< 60cm; \geq 20cm$				Esp HzA $< 20cm$			
0-10	52,7 \pm 16,6		63,0	A	23,7 \pm 7,5		31,9	B	6,8 \pm 0,7		7,2	B
10-20	32,5 \pm 27,0		59,8	A	21,0 \pm 7,4		28,7	B	4,0 \pm 0,5		4,6	B
20-50	89,8 \pm 50,6		131,8	A	23,2 \pm 10,4		35,2	B	3,0 \pm 0,6		3,7	B
50-100	93,1 \pm 47,0		136,7	A	32,5 \pm 18,0		53,2	B	2,5 \pm 0,3		2,8	B
Sítio 3. Arqueoantrossolo Hórtica												
	Esp HzA $\geq 60cm$				Esp HzA $< 60cm; \geq 20cm$				Esp HzA $< 20cm$			
0-10	300,5 \pm 65,7		352,9	A	31,4 \pm 22,4		51,6	B	6,4 \pm 1,4		7,7	B
10-20	318,5 \pm 119,2		452,8	A	30,3 \pm 23,8		53,2	B	3,7 \pm 1,1		4,8	B
20-50	1066,3 \pm 347,1		1437,5	A	25,0 \pm 30,1		59,8	B	1,8 \pm 0,1		2,0	B
50-100	1210,9 \pm 343,3		1429,3	A	37,3 \pm 53,5		99,1	B	2,1 \pm 0,4		2,4	B

Os resultados obtidos para K estão apresentados na Figura 11. Na Arqueoantrossolo Ágrico os teores de K foram estatisticamente superiores na gleba menos espessa em todas as camadas; e inferiores em sua gleba mais espessa nas camadas 0-10cm e 20-50cm, quando comparadas ao solo adjacente. Na Arqueoantrossolo Proto-Hórtica os teores de K para a camada 0-10cm foram inferiores aos encontrados em solo adjacente. Na Arqueoantrossolo Hórtica as diferenças não foram significativas. Os teores de K médio estão abaixo da faixa considerada adequada nos três sítios, de 0,16 a 0,30 (Alcarde, 1991). A carência de K é apontada por diversos autores (Falcão 2003, Glaser 2010) como fator limitante para alguns cultivos em Terra Preta e Terra Mulata.

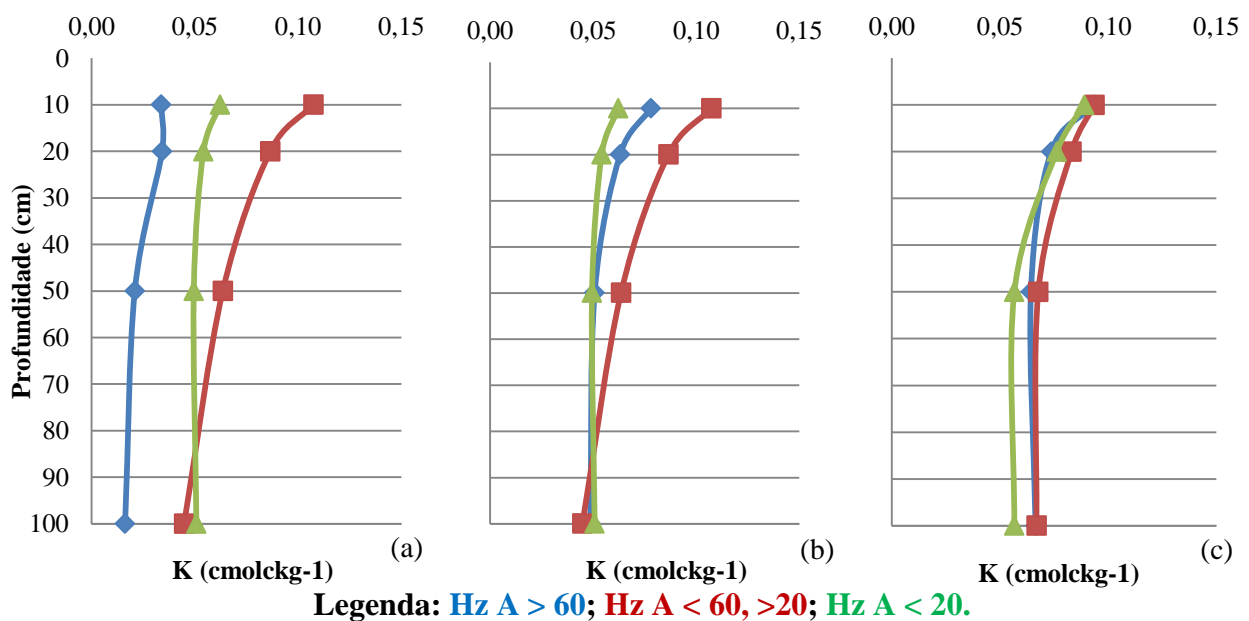


Figura 11. K em função da profundidade em (a) Arqueoantrossolo Ágrico, (b) Arqueoantrossolo Proto-Hórtica e (c) Arqueoantrossolo Hórtica.

Os resultados obtidos para Ca^{2+} estão apresentados na Figura 11. Os teores foram superiores na camada 0-10cm da gleba mais espessa da Terra Mulata. Na Arqueoantrossolo Proto-Hórtica não foram encontradas diferenças significativas. Os teores de cálcio na gleba mais espessa da Arqueoantrossolo Hórtica foram superiores em todas as camadas exceto 0-10cm. Segundo Lima *et al.* (2002) e Schaefer *et al.* (2004) os altos teores de Ca estão relacionados a ossos de mamíferos e espinhas de peixes, total ou parcialmente carbonizados. As fezes humanas também são indicadas como fonte possível de P e Ca por diversos autores (Sombroek, 1966; Smith, 1980; Woods, 2003). Birk (2011) avaliou a presença de biomarcadores relacionados a fezes em Terra Pretas, concluindo que estes solos apresentam traços em níveis elevados de fezes humanas, sugerindo que esta pode ter contribuído significativamente para o aporte de P, Ca, Mn e Zn.

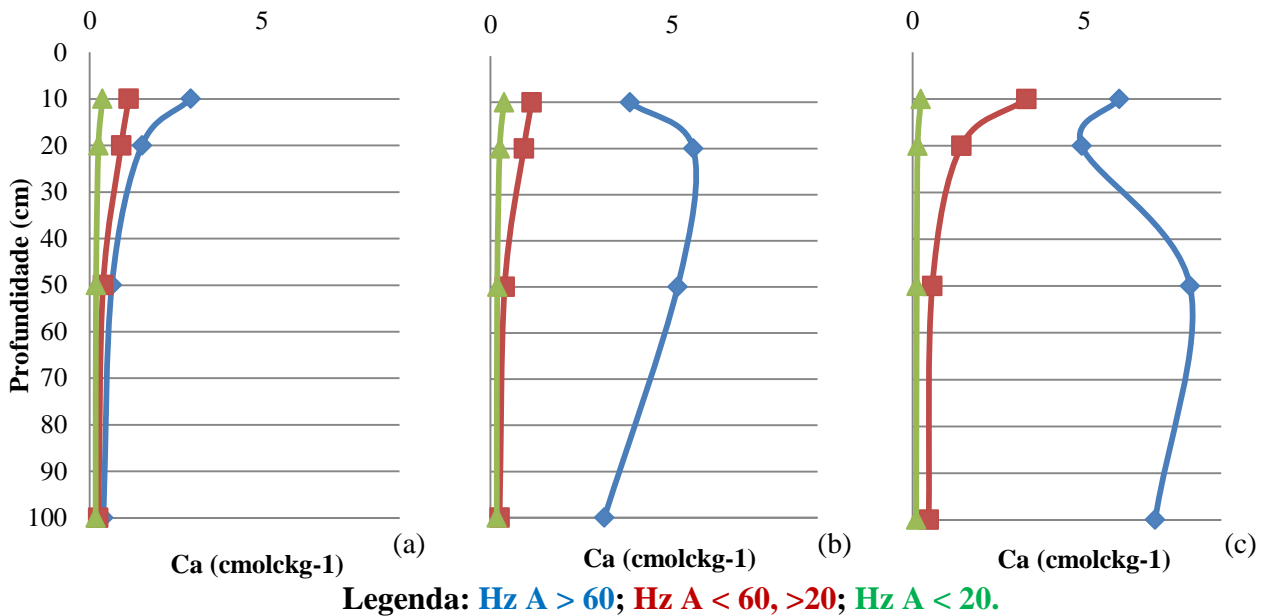


Figura 11. Ca^{2+} em função da profundidade em (a) Arqueoantrossolo Ágrico, (b) Arqueoantrossolo Proto-Hórtica e (c) Arqueoantrossolo.

Os resultados obtidos para Mg^{2+} estão apresentados na Figura 12. Os teores de Mg não variaram significativamente no Arqueoantrossolo Ágrico e no Arqueoantrossolo Proto-Hórtica. No entanto, foram significativamente superiores em todas as camadas, exceto 50-100cm, da gleba mais espessa da Arqueoantrossolo Hórtica. Mesmo na gleba mais espessa da Arqueoantrossolo Hórtica os teores de Ca e Mg ficaram abaixo dos relatados na literatura (Sombroek, 1966; Falesi, 1972; Sombroek, 2003; Kern, 2003; Falcão, 2003), ainda assim foram os Cátions que mais contribuíram para a soma de bases (SB). Por outro lado, Kern e Kämpf (1989), encontrou teores mais elevados em Terras Pretas na bacia do Rio Trombetas, em Cachoeira-Porteira, da ordem de 7cmol Mg.

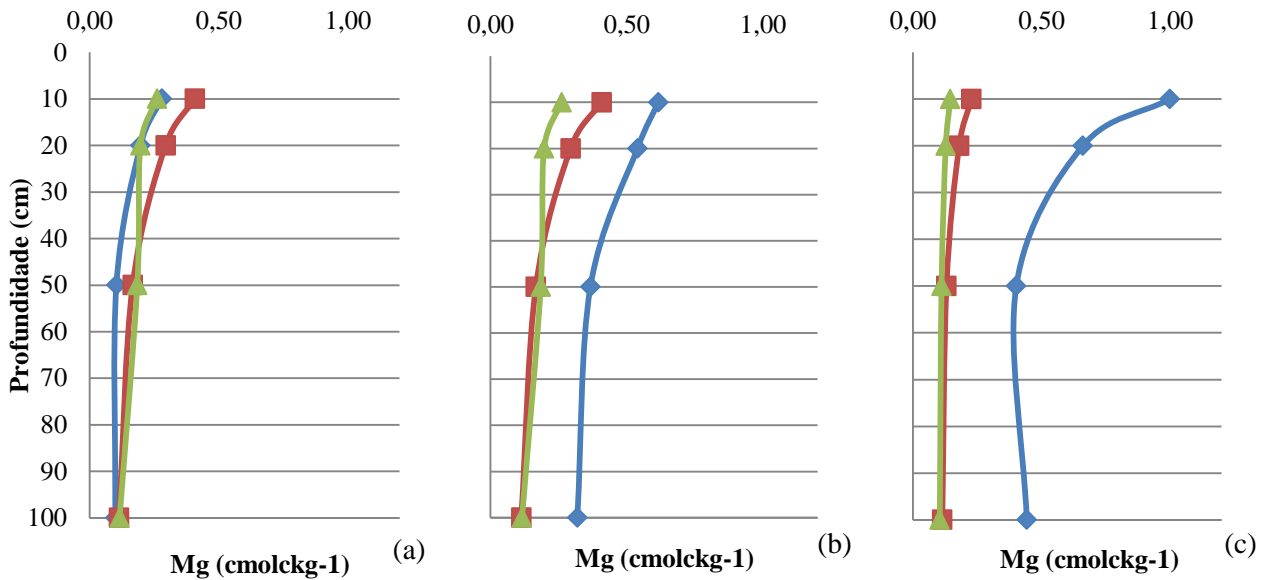


Figura 12. Mg^{2+} em função da profundidade em (a) Arqueoantrossolo Agrico, (b) Arqueoantrossolo Proto-Hortica e (c) Arqueoantrossolo Hortica.

Os resultados obtidos para Mn estão apresentados na Figura 13. Os teores não variaram significativamente na Terra Mulata. No entanto na Arqueoantrossolo Proto-Hortica e na Arqueoantrossolo Hortica foram superiores ao solo adjacente, exceto na camada 50-100cm da Arqueoantrossolo Proto-Hortica. Segundo Sombroek (1966) e Falesi, (1972), o teor de Mn pode ser utilizado com certa segurança para delimitar os sítios de assentamento humano. Logo, os resultados concordam em estabelecer a diferenciação entre o modelo antropogênico “agrícola” e o modelo antropogênico “lixreira” formadores da Arqueoantrossolo Agricoe das Terras Pretas, respectivamente.

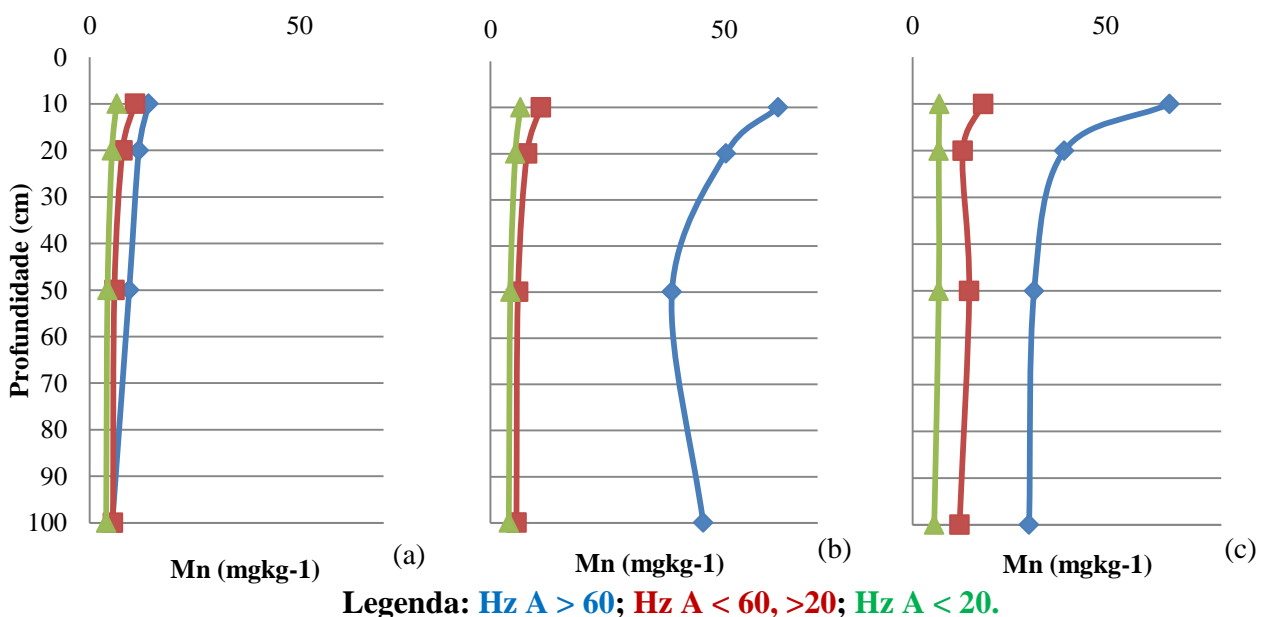


Figura 13. Mn em função da profundidade em (a) Arqueoantrossolo Agrico, (b) Arqueoantrossolo Proto-Hortica e (c) Arqueoantrossolo Hortica.

Os resultados obtidos para Zn estão apresentados na Figura 14. Os teores de zinco não foram significativamente diferentes, apesar das médias mais elevadas, exceto para as camadas 50-100cm da Arqueoantrossolo Ágrico e Arqueoantrossolo Hórtica, onde foram inferiores e superiores respectivamente ao solo adjacente. O desvio padrão elevado das médias das glebas mais espessas das Terras Pretas Hórtica e Proto-Hórtica foi responsável pelas diferenças não significativas, discordando da literatura corrente (Kern, 1999; Kern 2010). Provavelmente a deposição de Zn não ocorreu de forma homogênea quando consideramos a espessura do horizonte A antrópico como fator determinante das glebas para amostragem.

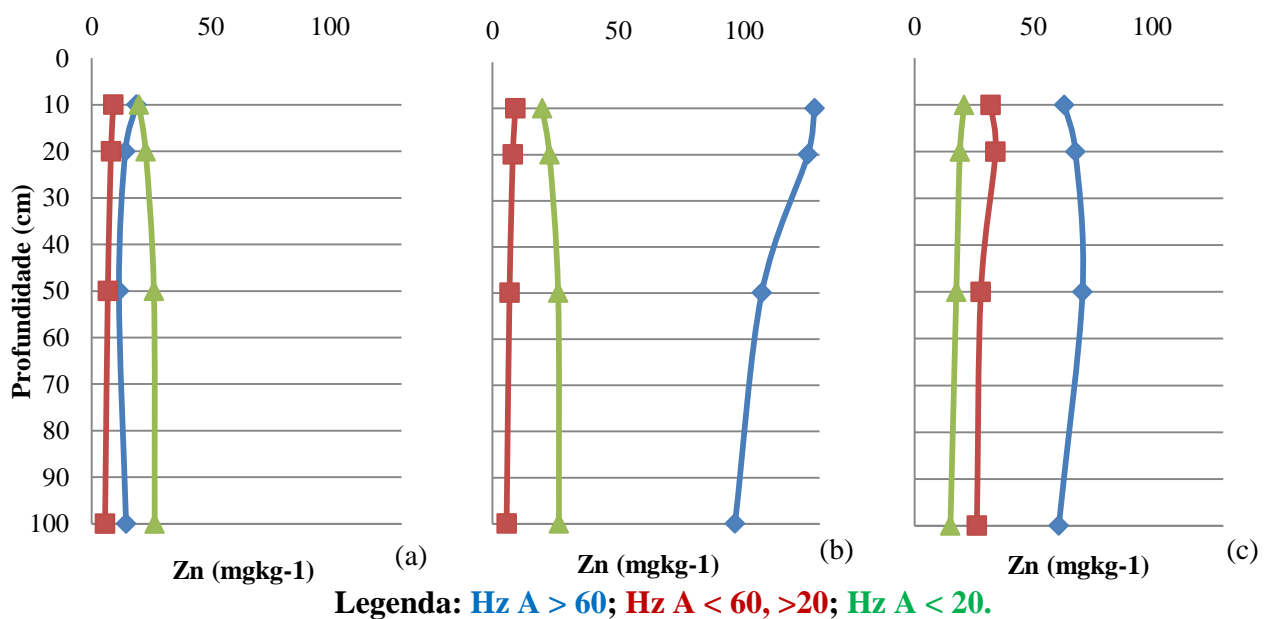


Figura 14. Zn em função da profundidade em (a) Arqueoantrossolo Ágrico, (b) Arqueoantrossolo Proto-Hórtica e (c) Arqueoantrossolo Hórtica.

Os teores de B não apresentaram variação significativa, conforme apresentado na Figura 15. No entanto os teores obtidos estão na faixa adequada segundo Malavolta (2005).

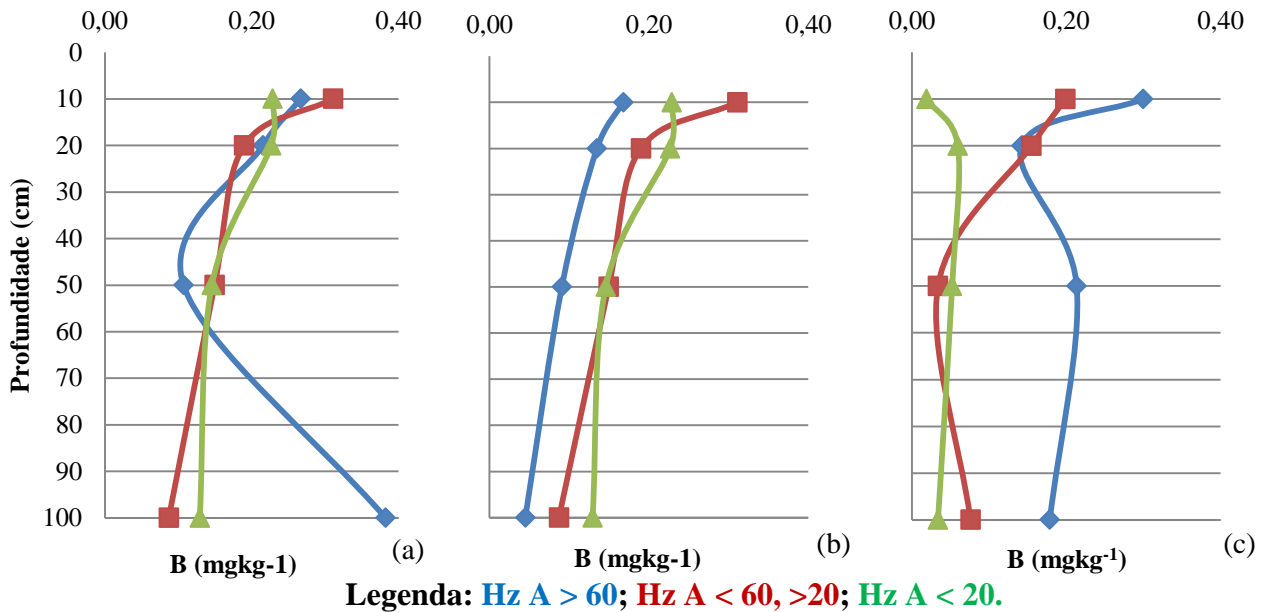


Figura 15. Boro em função da profundidade em (a) Archeoantrossolo Ágrico, (b) Archeoantrossolo Proto-Hórtica e (c) Archeoantrossolo.

Os resultados obtidos para Fe estão apresentados na Figura 16. Na Archeoantrossolo Ágrico os 1 solos adjacentes foram superiores nos teores de ferro em todas as camadas exceto 20-50cm. Na Archeoantrossolo Proto-Hórtica os teores nos solos adjacentes foram superiores em todas as camadas. Na Archeoantrossolo Hórtica os teores de ferro dos solos adjacentes foram superiores apenas nas camadas superficiais.

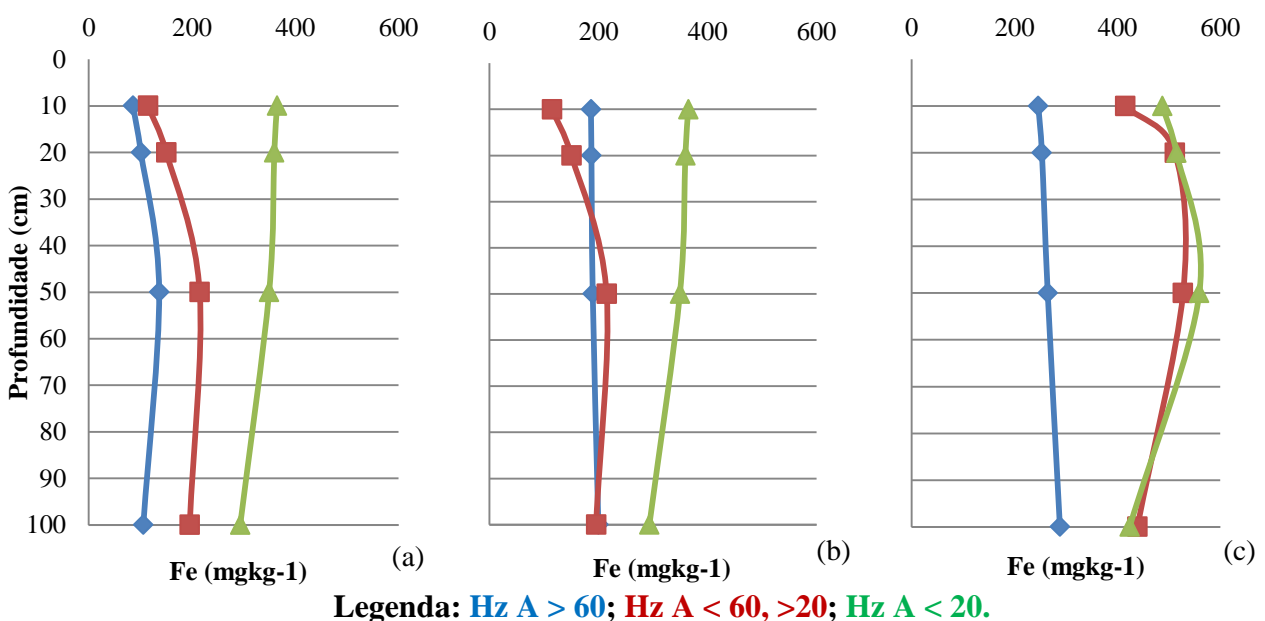


Figura 16. Fe em função da profundidade em (a) Archeoantrossolo Ágrico, (b) Archeoantrossolo Proto-Hórtica e (c) Archeoantrossolo Hórtica.

Os resultados obtidos para capacidade de troca de cátions efetiva (t) estão apresentados na Figura 17. Na Archeoantrossolo Ágrico a capacidade de troca de cátions

efetiva (t) foi inferior nas camadas sub-superficiais em relação ao solo adjacente, possivelmente relacionada a menores teores de argila. Na Arqueoantrossolo Hórtica, em sua gleba mais espessa, as médias foram superiores para todas as camadas exceto 0-10cm. Tal resultado discorda parcialmente de Lehmann (2003), que encontrou valores menores para capacidade de troca de cátions efetiva (t) em Arqueoantrossolo quando comparada a solos adjacentes, possivelmente em razão da amostragem ter sido realizada nas camadas superficiais.

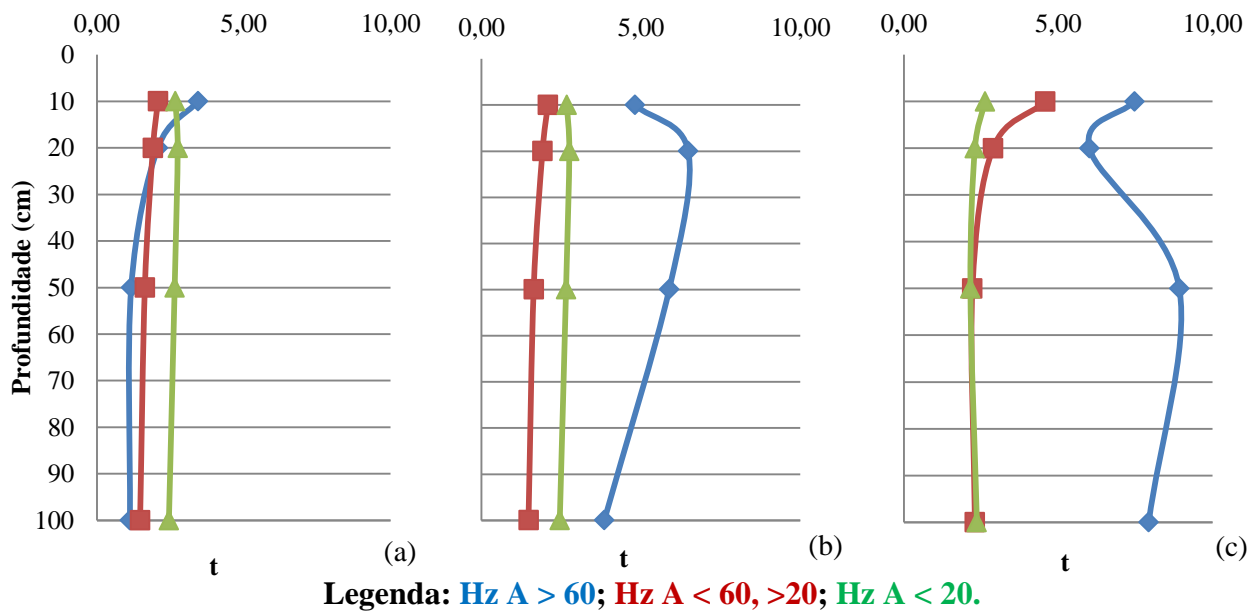


Figura 17. t (cmolckg^{-1}) em função da profundidade em (a) Arqueoantrossolo Ágrico, (b) Arqueoantrossolo Proto-Hórtica e (c) Arqueoantrossolo Hórtica.

Os resultados obtidos para capacidade de troca de cátions (T) estão apresentados na Figura 18. Na Arqueoantrossolo Ágrico as médias foram inferiores ou não diferiram significativamente dos solos adjacentes, sugerindo que o processo “agrícola” não contribuiu com altos teores de carbono pirogênico capaz de trazer acréscimos significativos a CTC. Por outro lado os teores superiores em solos adjacentes podem ser explicados por maiores teores de argila. Na Arqueoantrossolo Hórtica e Proto-Hórtica a capacidade de troca de cátions foi superior para as camadas subsuperficiais, quando comparada a gleba menos espessa e ao solo adjacente. Esses valores elevados de t e T podem ser explicados não somente pelo alto teor de material orgânico como também pela maior densidade de carga por unidade de carbono presente no material pirogênico (Sombroek, 1993; Liang, 2006; Glaser, 2001; Cunha, 2007)

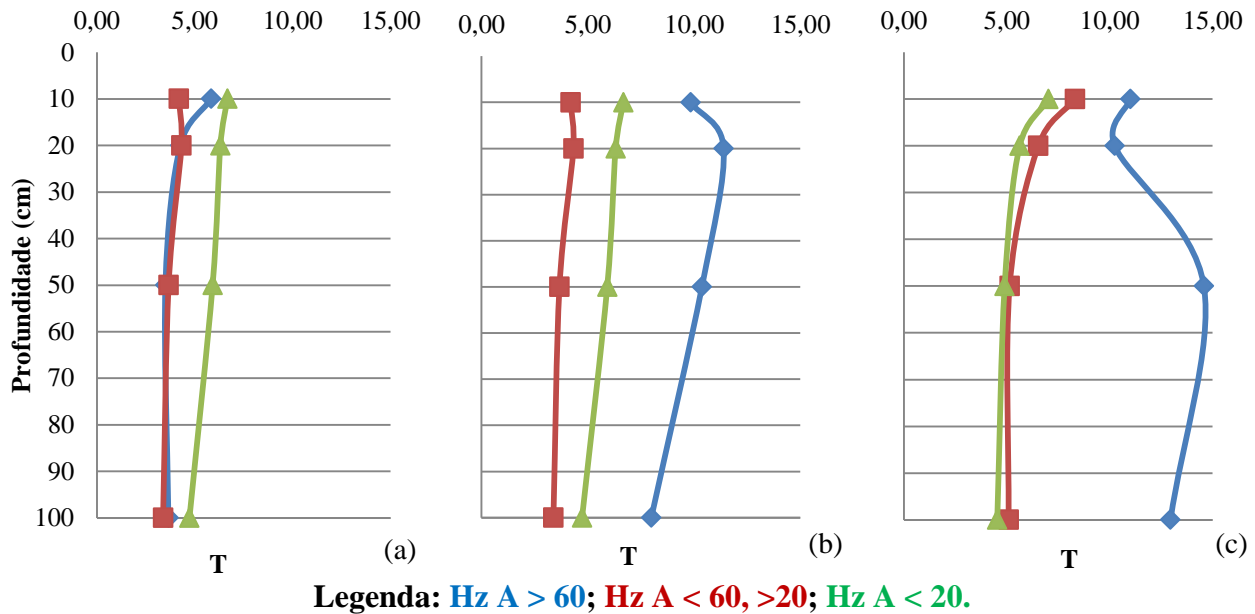


Figura 18. T (cmolckg⁻¹) em função da profundidade em (a) Arqueoantrossolo Ágrico, (b) Arqueoantrossolo Proto-Hórtica e (c) Arqueoantrossolo Hórtica.

2.4. CONCLUSÕES

A divisão por glebas em função da espessura do horizonte A antrópico tendeu a diferenciar a gleba mais espessa em oposição à gleba menos espessa e ao solo adjacente imediato quanto aos estoques de C, N.

O estoque de C acumulado em um metro de solo foi significativamente superior ao solo adjacente imediato nos três casos estudados. Já o estoque de N acumulado em um metro de solo foi superior em dois dos três casos.

A relação C:N foi superior nas camadas subsuperficiais nos sítios classificados como Arqueoantrossolo Hórtico e Proto-Hórtico em relação aos solos adjacentes. Por outro lado, no sítio classificado como Arqueoantrossolo Ágrico não ocorreu tal diferenciação.

2.5. REFERÊNCIAS

- Acevedo, R.; Castro, E. 1998. *Negros do Trombetas: Guardiães de Matas e Rios*. 2. ed. Belém: Cejup/UFPA-NAEA. 278p.
- Alfaia, S.S.; Souza, L.A.G. de. 2002. *Perspectivas do uso e manejo dos solos da Amazônia*. In: Araújo, Q.R.de. (Org.). *500 anos de uso do solo no Brasil*. Editora da UESC. Ilhéus. p.311-327.

- Andrade, L.M.M. 2011. Terras Quilombolas em Oriximiná: pressões e ameaças. 1. ed. São Paulo: Comissão Pró-Índio de São Paulo. p.13-17.
- Amaral, E. F.; Silva, J.R.T.; Ribeiro Neto, M.A. 1998. Sistematização da coleta de dados para descrição morfológica de perfis de solo. Instruções Técnicas, No 9, p.1-4, ISSN 0104-9038.
- Arevalo, L.A.; Alegre, J.C.; Vilcahuaman, L.J.M. 2002. Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra. Embrapa Florestas, 41p: il. (Embrapa Florestas. Documentos, 73).
- Arroyo-Kalin, M. Slash-burn-and-churn: Landscape history and crop cultivation in pre-Columbian Amazonia. *Quaternary International* 249 (2012) 4 – 18.
- Barbosa de Faria, J. 1946. A cerâmica da tribo Uaboí dos rios Trombetas e Jamundá. Contribuição para o estudo da arqueologia pré-histórica do Baixo Amazonas. Ministério da Agricultura, CNPI. Publicação nº 89. Rio de Janeiro, Imprensa Nacional.
- Barrow, C.J. Biochar: Potential for countering land degradation and for improving agriculture. *Applied Geography* 34 (2012) 21-28.
- Brady, N.C.; Weil, R.R. Elementos da Natureza e Propriedades do Solo. Porto Alegre : Bookman, (2013) 686p.
- Constanza, R., d'Arge, de Groot, R., Stephen, F., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruello, J., Raskin, R.G., Suttonkk, P., van den Belt, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(1997): 253-260.
- Costa, M.L.; Behling, H.; Suguio, K.; Kämpf, N.; Kern, D.C. 2010. Paisagens Amazônicas sob a Ocupação do Homem Pré-Histórico: Uma Visão Geológica. In: Teixeira, W.G.

(org.). *As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas*. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.

Costa, M.L.; Kern, D.C.; Pinto, A.H.E.; Souza, J.R.T. The ceramic artifacts in archaeological black earth (terra preta) from lower Amazon region, Brazil: Mineralogy. In: *Acta Amazônica*, vol. 34 (2004): 165-178.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2009. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 412p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1997. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro : EMBRAPA-CNPq. 212p.

ESRI. *ArcGIS 9: Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. California, USA, 2003.

Falcão, N.P.S.; Moreira, A.; Comenford, N.B. 2010. A fertilidade dos solos de terra preta de índio da Amazônia Central. In: Teixeira, W.G. (org.). *As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas*. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.

Fearnside, P.M. 2007. Serviços ambientais como base para o uso sustentável de florestas tropicais na Amazônia brasileira. In: Buenafuente, S. (ed.) *Amazônia: riquezas naturais e sustentabilidade sócio-ambiental*. Editora da Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, Roraima.

Fearnside, P.M. 2001. Salvar florestas tropicais como uma medida de mitigação do efeito estufa: o assunto que mais divide o movimento ambientalista. PP.193-215. In: de Macedo, J.L.V., Wandelli, E.V; da Silva Junior, J.P. (eds) *Palestras, III Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais*. Documentos 17, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)-Centro de Pesquisas Agroflorestais da Amazônia (CPAA), Manaus, Amazonas. 248 pp.

Fearnside, P.M. & R.I. Barbosa. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management* 108(1998): 147-166.

- Fraser, J.; Teixeira, W.G.; Falcão, N.P.S.; Woods, W.; Lehmann, J.; Junqueira, A.B. 2011. Anthropogenic soils in the Central Amazon: from categories to a continuum. *Area* 43.3 (2011a): 264-273.
- Fraser, J.A.; Junqueira, A.B.; Clement, C.R. Homegardens on Amazonian Dark Earth, non-anthropogenic upland, and floodplain soils along the Brazilian middle Madeira river exhibit diverging agrobiodiversity. *Economic Botany*, 65, 1 (2011b): 1-12.
- Fraser, J.A.; Junqueira, A.B.; Kawa, N.C.; Moraes, C.P.; Clement, C.R. Crop diversity on Anthropogenic Dark Earths in central Amazonia. *Hum Ecol* (2011c) 39 : 395-506.
- German, L.A. 2003. Historical contingencies in the coevolution of environment and livelihood: contributions to the debate on Amazonian Black Earth. *Geoderma* 111 (2003): 307-331.
- Glaser, B.; Haumaier, L.; Guggenberger, G.; Zech, W. 1998. Black carbon in soils: the use of benzenecarboxylic acids as specific markers. *Org. Geochem.* 29 (4): 811-819.
- Guapindaia, V. 2008. Além da margem do rio – a ocupação Konduri e Pocó na região do Porto Trombetas, PA. Tese de Doutorado. São Paulo. USP : Museu de Arqueologia e Etnologia. 203p.
- Guapindaia, V.; Magalhães, M.; Lopes, P. 2007. Relatório de Prospecção na Estrada Saracá-Oeste, Mina Saracá V. (Manusc. Inéd. 12 f). Belém. MPEG/MRN/FIDESA.
- Guapindaia, V.; Lopes, D. 2005. Relatório da Sétima e da Oitava Etapas de Campo: Escavações nos Sítios PA-OR-63: Boa Vista e PA-OR-70: Horta. (Manusc. Inéd. 46 f). Belém, MPEG/MRN/FADESP.
- Guapindaia, V.; Pereira, E.; Silveira, M.; Lopes, D. 2001. Relatório de Prospecção e Salvamento Arqueológico nos Platôs Saracá, Papagaio e Periquito e na Correia Transportadora Saracá/Aviso/Almeidas. (Manusc. Inéd. 61f). Belém, MPEG/MRN/FADESP.

- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., Pagani, M., Raymo, M., Royer, D.L., Zachos, J.C. Target atmospheric CO₂: where should humanity aim? *Open Atmos Sci J.*, 2 (2008): 217-31.
- Hilbert, P.P. 1955. A cerâmica arqueológica da região de Oriximiná. In: Anais do XXXI Congresso Internacional de Americanistas. São Paulo, Departamento de Historia de América, Universidad de Sevilla.
- Hilbert, P.P.; Hilbert, K. 1980. Resultados preliminares da pesquisa arqueológica nos rios Nhamundá e Trombetas, Baixo Amazonas. Belém, Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi, (Nova série Antropologia).
- IBGE. 2001. Mapa de solos do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2001. 1 mapa, color. Escala 1:5.0.0. Disponível em: <<http://w.ibge.gov.br>>. Acesso em: 18 mai. 2012.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007. Synthesis Report. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf. Acessado em 20 de março de 2012.
- Junqueira, A.B.; Shepard Jr, G.H.; Clement, C.R.; Secondary forests Anthropogenic soils of the middle Madeira River: Valuation, Local Knowledge, and Landscape Domestication in Brazilian Amazonia. *Economic Botany*, 65 (2011) : 85-99.
- Junqueira, A.B.; Shepard Jr, G.H.; Clement, C.R.; Secondary forests on anthropogenic soils in Brazilian Amazônia conserve agrobiodiversity. *Biodivers Conserv* (2010) 19: 1933-1961.
- Kämpf, N.; Woods, W.I.; Kern, D.C.; Cunha, T.J. 2010. Classificação de Terras Pretas de Índio e Outros Solos Antrópicos Antigos. In: Teixeira, W.G. (org.). *As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas*. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.

- Kern D.C.; D'Aquino, G.; Rodrigues, T.E.; Franzão, F.J.L.; Sombroek, W.; Myers T.P.; Neves, E.G. 2003. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: Lehman et al (eds), Amazonian Dark Earths: Origin, properties, management. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands: 51-75
- Kern, D., Kampf, N. O efeito de antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 13 (1989): 219-225.
- Kern, D. Caracterização pedológica de solos com terra arqueológica na região de Oriximiná. Porto Alegre. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 242p, 1988.
- Knicker, H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry* 85(2007): 91-118.
- Knowles, O.A.; Robinson, B.H.; Contangelo, A.; Clucas, L. 2011. Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids. *Science of the Total Environment* 409 (2011): 3206-3210.
- Laird, D.A.; Fleming, P.; Wang, B.; Horton, R.; Karlen, D. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158 (2010): 436-442.
- Laird, D.A.; Fleming, P.; Davis, D.D.; Horton, R.; Wang, B.; Karlen, D.L. 2010b. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158 (2010): 443-449.
- Lehmann, J. A handful of carbon. *Nature*, 447(2007): 143-144.
- Lehmann, J.; Silva Jr, J.P.; Steiner, C.; Nehls, T.; Zech, W.; Glaser, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249 (2003): 343-357.

- Liang, B.; Lehmann, J.; Sohi, S.P.; Thies, J.E.; O'Neill, B.; Trujillo, L.; Gaunt, J.; Solomon, D.; Grossman, J.; Neves, E.G.; Luizão, F.J. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic Geochemistry* 41 (2010): 206-213.
- Liang, B.; Lehmann, J.; Solomon, D.; Kinyangi, J.; Grossman, J.; O'Neill, B.; Skjemstad, J.O.; Thies, J.; Luizão, F.J.; Petersen, J.; Neves, E.G. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70 (2006): 1719-1730.
- Lima, H. N.; Schaefer, C.E.G.R.; Kämpf, N.; Costa, M. L.; Souza, K.W. 2010. Métodos de Caracterização Química de Amostras de Horizontes Antrópicos das Terras Pretas de Índio. In: Teixeira, W.G. (org.). *As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas*. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- Lima, H.N.; Schaefer, C.E.R.; Mello, J.W.V.; Gilkes, R.J.; Ker, J.C. Pedogenesis and pre-Colombian land use of "Terra Preta Anthrosols" ("Indian black earth") of Western Amazonia. *Geoderma* 110 (2002): 1-17.
- Machado, P.L.O.A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Quim. Nova*, Vol. 28, No. 2. (2005): 329-334.
- Mazoyer, M.; Roudart, L. 2001. *História das agriculturas do mundo: do neolítico à crise contemporânea*. Lisboa: Instituto Piaget. 520 p.
- Meddens, A.J.H. 2006. Possibilities of mapping Amazonian Dark Earths using remote sensing techniques. *Capita Selecta GIS / Remote sensing - Wageningen University*.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. 2001. *Plano de manejo da Floresta Nacional de Saracá-Taquera, Estado do Pará – Brasil*. Curitiba. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/flonasaraca>>. Acesso em: 10 de março de 2011.

- Moreira, A.; Teixeira, W.G.; Martins, G.C.; Falcão, N.P.S. 2010. Métodos de Caracterização Química de Amostras de Horizontes Antrópicos das Terras Pretas de Índio. In: Teixeira, W.G. (org.). As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- Moreira, A. Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia ocidental. *Bragantia* 66,2 (2007): 307-315.
- Nelson, D.W. & Sommers, L.E. Total carbon, organic carbon e organic matter. In: Page, A.L., Miller, R.H. & Keeney, D.R., eds. *Methods of soil analysis - Chemical and Microbiological Properties*. Part 2. Madison, American Society of America, 1986. p.539-579.
- Neves Jr, A.F. 2008. Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) na Amazônia Central. Tese de Doutorado : ESALQ / USP.
- O'Dwyer, E.C. "Remanescentes de Quilombos na Fronteira Amazônica: A etnicidade como instrumento de luta pela terra." Departamento de Antropologia, ICHF-UFF. Rio de Janeiro, 1993.
- Prendergast-Miller, M.T.; Duvall, M.; Sohi, S.P. 2011. Localisation of nitrate in the rhizosphere of biochar-amended soils. *Soil Biology & Biochemistry* 43 (2011) : 2243: 2246.
- Sato, S.; Neves, E.G.; Solomon, D.; Liang, B.; Lehmann, J. Biogenic calcium phosphate transformation in soils over millennial time scales. *J Soils Sediments* (2009) 9: 194-205.
- Scoles, Ricardo. Do rio Madeira ao rio Trombetas: novas evidências ecológicas e históricas da origem antrópica dos castanhais amazônicos. *Novos Cadernos NAEA*. v. 14, n.2, (2011) p.265-282.

- Silva, F.A. 2010. As atividades econômicas das populações indígenas amazônicas e a formação das terras pretas: O exemplo dos Asurini do Xingu. In: Teixeira, W.G. (org.). As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- Sombroek, W.G.; Ruivo, M.L.; Fearnside, P.M.; Glaser, B.; Lehmann, J. Amazonian Dark Earths as carbon stores and sinks. In.: Lehmann, J.; Kern, D.C.; Glaser, B.; Woods, W.I. (Eds.). Amazonian Dark Earths: origin, properties, and management. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. p.125-139.
- Sombroek, W.; Kern, D.; Rodrigues, T.; Cravo, M.S.; Jarbas, T.C.; Woods, W.; Glaser, B. Terra Preta and Terra Mulata: pre-Columbian Amazon kitchen middens and agricultural fields, their sustainability na their replication. 17th World Congress Soil Science, Thailand, 2002. Symposium no. 18, Paper no. 1.935: 14-21.
- Sombroek, W.G. 1966. Amazon Soils: A Reconnaissance of The Soils of the Brazilian Amazon Valley. Pudoc, Wageningen. 292p.
- Spokas, K.A.; Novak, J.M.; Venterea, R.T. 2012. Biochar's role as an alternative N-fertilizer: ammonia capture. *Plant Soil* 350 (2012): 35-42.
- Steiner, C.; Glaser, B.; Teixeira, W.G.; Lehmann, J.; Blum, W.E.H.; Zech, W. 2008. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *J. Plant. Nutr. Soil. Sci.* 171 (2008): 893-899.
- Teixeira, W.G.; Martins, G.C.; Macedo, R.S.; Neves Jr, A.F.; Moreira, A.; Benites, V.M.; Steiner, C. 2010. As propriedades físicas e hídricas dos horizontes antrópicos das Terras Pretas de Índio na Amazônia Central. In: Teixeira, W.G. (org.). As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- Veloso, C.A.C.; Viégas, I.J.M.; Oliveira, R.F.; Botelho, S.M. 2006. Amostragem de solo e planta para análise química. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental. 39 p.: (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 266).

- Vomocil, J.A.P. In: Blake, C.A. 1965. ed. Methods of soil analysis. Madison, American Society of Agronomy.
- Woods, W. 2010. Os solos e as ciências humanas: interpretação do passado. In: Teixeira, W.G. (org.). As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- Yuan, J.H.; Xu, R.K.; Wang, N.; Li, J.Y. 2011. Amendment of acid soils with crop residues and biochars. *Pedosphere* 21,3 (2011): 302-308.
- Zimmerman, A.R.; Gao, B.; Ahn, M.Y.; Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology & Biochemistry* 43 (2011) 1169-1179.