



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**MARCELO DAYRON RODRIGUES SOARES**

**ATRIBUTOS DO SOLO EM TERRAS PRETAS  
ARQUEOLÓGICAS SOB DIFERENTES USOS**

CAMPINAS  
2018

**MARCELO DAYRON RODRIGUES SOARES**

**ATRIBUTOS DO SOLO EM TERRAS PRETAS  
ARQUEOLÓGICAS SOB DIFERENTES USOS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na área de concentração Água e Solo.

Orientador: Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza

Este Trabalho Corresponde à  
Versão Final da Tese defendida  
pelo Aluno – Marcelo Dayron  
Rodrigues Soares, e Orientado  
pelo Professor Dr. Zigomar  
Menezes de Souza.

CAMPINAS

2018

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** FAPESP, 2015/24280-8

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

So11a Soares, Marcelo Dayron Rodrigues, 1989-  
Atributos do solo em terras pretas arqueológicas sob diferentes usos /  
Marcelo Dayron Rodrigues Soares. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Zigomar Menezes de Souza.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Agrícola.

1. Ciência do solo. 2. Mecânica do solo. 3. Solo - Uso - Planejamento. 4.  
Solos - Manejo. I. Souza, Zigomar Menezes, 1970-. II. Universidade Estadual  
de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Atributos do solo em terras pretas arqueológicas sob diferentes usos

**Palavras-chave em inglês:**

Soil science

Soil mechanics

Soil - Usage - Planning

Solos - Management

**Área de concentração:** Água e Solo

**Titulação:** Doutor em Engenharia Agrícola

**Banca examinadora:**

Zigomar Menezes de Souza [Orientador]

Edson Eiji Matsura

Reginaldo Barbosa da Silva

**Data de defesa:** 20-08-2018

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Marcelo Dayron Rodrigues Soares**, aprovada pela Comissão Julgadora em 20 de agosto de 2018, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI

---

Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza - Presidente e Orientador

---

Prof. Dr. Edson Eiji Matsura- Membro Titular

---

Dr. Reginaldo Barboza da Silva - Membro Titular

---

Dr. Fernando Silva Araújo - Membro Titular

---

Dra. Rose Luiza Moraes Tavares - Membro Titular

**A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do discente.**

## ***DEDICATÓRIA***

*Dedico este trabalho a minha mãe/avó (in memoriam) e aos meus familiares, eu amo vocês!*

## **AGRADECIMENTOS**

À **Deus**, por me levantar e recarregar minhas energias nos momentos difíceis.

A minha Mãe Cizineth Rodrigues, minha família, sou grato por todo apoio.

Ao professor Zigomar Menezes de Souza, por todo ensinamento, paciência, aprendizado e pela força nos momentos difíceis que passei.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM, por financiar a bolsa de estudos durante o início da pesquisa.

A Universidade Federal do Amazonas -UFAM, pelo apoio durante a coleta do material.

A FAPESP, pelo financiamento do projeto (Projeto: 2015/24280-8).

Aos meus amigos, Milton César, Angela Maria, José Maurício, Eulina Nogueira, Lucas Reis, Jaqueline Abreu, Douglas Marcelo, Guilherme Castioni, Iago, Camila Vieira e aos amigos do IEAA/UFAM, por todo companheirismo e amizade.

Ao grupo de pesquisa Solos e Ambientes Amazônicos por todo apoio nas análises e coletas, sou eternamente grato.

Aos amigos do laboratório de solos Feagri/UNICAMP, Ingrid, Eliseu, Lenon e Renato, pelos momentos de descontração e compartilhamento de experiência.

Aos técnicos do laboratório de solos, Célia Panzarini Gonçalves e Antonio Javarez Junior.

## **RESUMO**

Na paisagem Amazônica, áreas com Terras Pretas Arqueológicas (TPAs) são cada vez mais fragmentadas devido ao desmatamento e ao uso agropecuário, o que provoca transformações principalmente nos atributos do solo. Assim, a pesquisa teve como objetivo estudar as alterações no comportamento físico, mecânico e químico em terras pretas arqueológicas sob diferentes usos (feijão guandu e pastagem), tendo como referencial terra preta arqueológica sob floresta natural. Para determinar a variação espacial dos atributos químicos do solo, foram delimitadas malhas amostrais, com 88 pontos para área de pastagem e floresta natural e 90 pontos para o feijão guandu, com amostras coletadas nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. A qualidade física do solo foi avaliada por meio do intervalo hídrico ótimo e funções específicas do solo, com amostras coletadas nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Para a de pressão de preconsolidação, foram coletadas amostras nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20 m. Após as análises dos dados, foram realizadas as análises de estatística descritiva e geoestatística. Desta forma, a compreensão dos processos envolvidos na degradação física das TPAs permite entender os processos que determinam a sua degradação e a busca por sistemas de cultivos menos impactantes para este tipo de solo. O estudo entre os cultivos de feijão guandu e pastagem em terra preta arqueológica determinou a transformação de florestas nativas em pastagens de solos antropogênicos, provocou aumento da densidade do solo e resistência do solo à penetração e, simultaneamente redução da macroporosidade, conferindo conseqüentemente a essas áreas, menor conteúdo de água nos limites críticos do intervalo hídrico ótimo e, menor qualidade física do solo. Em relação aos atributos químicos, verificou-se que o feijão guandu apresentou maior continuidade espacial e menor variabilidade, indicando homogeneidade dos dados. A pressão de preconsolidação em terra preta arqueológica sob usos de pastagem e feijão guandu, revelaram que o teor de matéria orgânica nesses usos é quem alivia as pressões sobre esses manejos. Com redução da coesão devido ao aumento do conteúdo de água, a floresta natural nas duas camadas analisadas, foi mais suscetível ao processo compressivo que os usos de pastagem e feijão guandu.

**Palavras-chave:** Manejo do solo, física do solo, capacidade de suporte de carga, estrutura do solo.

## **ABSTRACT**

In the Amazonian landscape, areas with Black Archaeological Land-TPA's are increasingly fragmented due to deforestation and agricultural use, which causes transformations mainly in soil attributes. Thus, the research aims to study the impact of anthropic changes and management on the physical, mechanical and chemical behavior of black archeological lands under different uses (guandu bean and pasture), with black archaeological terrain under natural forest. To determine the spatial variation of soil chemical attributes, sampling meshes were delineated, with 88 points for pasture and natural forest and 90 points for guandu bean, with samples collected in the layers of 0.00-0.05, 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m. The soil physical quality was evaluated by means of the optimal water range and specific soil functions, with samples collected in the layers of 0.00-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.40 m. As for preconsolidation pressure, samples were collected in the layers of 0.00-0.10 and 0.20 m. After analysis of the data, descriptive and geostatistical statistics analyzes were performed. In this way, the understanding of the processes involved in the physical degradation of the TPA's allows to understand the processes that determine its degradation and the search for crop systems less impacting to their characteristics. The study of the cultivation of guandu bean and black archeological land pasture has led to the conversion of native forests to pasture in anthropogenic soils, increasing soil density and soil resistance to penetration, and simultaneously reducing macroporosity. these areas, lower water content in the critical limits of the optimal water range, and lower soil physical quality. Regarding the chemical attributes, these showed that the beans showed greater spatial continuity and lower data variability, indicating homogeneity of the data. The pressure of preconsolidation in archaeological black earth under pasture and guandu bean, showed that the organic matter content in these uses is what alleviates the pressures on these uses. With reduced cohesion due to increased water content, the natural forest in the two layers analyzed was more susceptible to the compressive process than the pasture and guandu bean uses.

**Key words:** Soil management, soil physics, load bearing capacity, soil structure.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Semivariograma experimental.	23
Figura 2 - Localizações dos ambientes de Terra Preta Arqueológica sob os respectivos usos em Novo Aripuanã, Amazonas.	29
Figura 3 - Representação das malhas amostrais e pontos de coleta nas áreas de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas.	30
Figura 4 - Coleta dos anéis volumétricos em terras pretas arqueológicas transformadas e naturais.	31
Figura 5 - Coleta de solo nas áreas de estudo em terras pretas arqueológicas.	32
Figura 6 - Coleta das amostras em corpo de prova para análise de pressão de preconsolidação em terras pretas arqueológicas sob diferentes usos.	32
Figura 7 - Áreas de estudo (pastagem, feijão guandu e floresta).	33
Figura 08 - Localização das áreas de estudos.	52
Figura 9 - Box-plot dos atributos físicos do solo utilizados no ajuste do IHO das terras pretas arqueológicas sob diferentes manejos, nas camadas de 0,0 – 0,10 (A), 0,10 – 0,20 (B) e 0,20 – 0,40 m (C).	56
Figura 10 - Retenção de água no solo em função do potencial matricial ( $\Psi_m$ ) em terras pretas arqueológicas sob diferentes usos nas camadas 0,0-0,10 (A), 0,10-0,20 (B) e 0,20-0,40 m (C), segundo o modelo de Van Genuchten.	57
Figura 11 - Intervalo hídrico ótimo em áreas de TPAs, na camada de 0,20-0,40 m (A), representando a variação no conteúdo de água do solo na capacidade de campo (CC, $\psi = 0,010$ MPa), ponto de murcha permanente (PMP $\psi = 1,500$ MPa), porosidade de aeração ( $PA = 0,10$ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) e resistência do solo à penetração (RP = 2,0 MPa). Densidade do solo crítica = 2,09 Mg m <sup>-3</sup> . Teste de Tukey a 5% (B).	59
Figura 12 - Variação espacial do Intervalo Hídrico Ótimo das terras pretas arqueológicas sob diferentes manejos na camada de 0,0 – 0,10 m.	60
Figura 13. Localizações dos ambientes de Terra Preta Arqueológica sob os respectivos usos em Novo Aripuanã, Amazonas.	72
Figura 14 - Representação das malhas amostrais e pontos de coleta nas áreas de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas.	73

- Figura 15 - Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos químicos das terras pretas arqueológicas sob diferentes usos floresta, feijão e pastagem (A, B, C) respectivamente na camada de 0,00 – 0,05 m. [modelo (efeito pepita; patamar; alcance, GDE,  $R^2$ )]. 84
- Figura 16 - Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos químicos das terras pretas arqueológicas sob diferentes usos floresta, feijão e pastagem (D, E, F) respectivamente na camada de 0,05 – 0,10 m. [modelo (efeito pepita; patamar; alcance, GDE,  $R^2$ )]. 85
- Figura 17 - Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos químicos das terras pretas arqueológicas sob diferentes usos floresta, feijão e pastagem (G, H, I) respectivamente na camada de 0,10 – 0,20 m. [modelo (efeito pepita; patamar; alcance, GDE,  $R^2$ )]. 86
- Figura 18 - Localização das terras pretas arqueológicas sob diferentes usos no município de Novo Aripuanã, AM. 101
- Figura 19 - Modelo de capacidade de suporte de carga do solo (CSCS), o qual apresenta três diferentes “regiões” (a), (b) e (c) relacionadas a compactação. Região “a”: com compactação; “b”: sem compactação, porém com tendência a compactar; e “c” sem compactação. Adaptado de Dias Júnior et al. (2005). 104
- Figura 20 - Modelos de capacidade de suporte de carga para Terra Preta Arqueológica, todos sob floresta natural nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, no município de Novo Aripuanã-AM. 108
- Figura 21- Modelos de capacidade de suporte de carga para pastagem e feijão guandu em solos antropogênicos, tendo como referência a floresta natural na nas camadas de 0,00-0,10 (A e B) e 0,10-0,20 m (C e D), no município de Novo Aripuanã-AM. 109
- Figura 22 - Capacidade de suporte de carga em Terra Preta arqueológica sob diferentes usos na camada de 0,00-0,10 m em condições de alta (A) e baixa umidade (B) e na camada de 0,10-0,20 m em condições de alta (C) e baixa umidade (D). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. 110

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização granulométrica das áreas de estudo em diferentes camadas.	31
Tabela 2 - Coeficientes de ajuste da curva de retenção de água do solo em TPA sob diferentes usos.	58
Tabela 3 - Estatística descritiva dos atributos químicos do solo de terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,00 – 0,05m.	77
Tabela 4 - Estatística descritiva dos atributos químicos do solo de terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,05 – 0,10m.	78
Tabela 5 - Estatística descritiva dos atributos químicos do solo de terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,10 – 0,20m.	79
Tabela 6 - Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas dos atributos químicos do solo em TPA sob diferentes usos, na camada de 0,00 – 0,05 m.	81
Tabela 7 - Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas dos atributos químicos do solo em TPA sob diferentes usos, na camada de 0,05 – 0,10 m.	82
Tabela 8 - Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas dos atributos químicos do solo em TPA sob diferentes usos, na camada de 0,10 – 0,20 m.	83
Tabela 9 - Densidade amostral mínima com base no alcance dos semivariogramas para atributos químicos em áreas de terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,00 – 0,05 m.	87
Tabela 10 - Densidade amostral mínima com base no alcance dos semivariogramas para atributos químicos em áreas de terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,05 – 0,10 m.	88
Tabela 11 - Densidade amostral mínima com base no alcance dos semivariogramas para atributos químicos em áreas de terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,10 – 0,20 m.	89
Tabela 12 - Caracterização do solo das camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m em terras pretas arqueológicas sob diferentes usos.	106
Tabela 13: Teste de significância, segundo Snedecor & Cochran (1989), entre os modelos de capacidade se suporte de carga de terra preta arqueológica sob floresta natural em diferentes camadas.	107

## SUMÁRIO

CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	14
1.1 INTRODUÇÃO GERAL.....	14
1.2 HIPÓTESE.....	18
1.3 OBJETIVOS .....	18
1.3.1 Geral .....	18
1.3.2 Específicos .....	18
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	18
1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
1.5.1 Caracterização geral das terras pretas arqueológicas .....	19
1.5.2. Variabilidade espacial dos atributos do solo .....	21
1.5.3 Atributos do solo na avaliação do manejo de áreas agrícolas .....	25
1.6 METODOLOGIA GERAL.....	29
1.6.1 Localização e caracterização das áreas de estudo .....	29
1.6.2. Metodologia de Campo .....	31
1.6.3 Análises físicas do Solo.....	33
1.6.4 Análises químicas do solo .....	37
1.6.5 Análise dos dados.....	37
1.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	39
CAPÍTULO II: USO DE PASTAGEM EM TERRAS PRETAS ARQUEOLÓGICAS REDUZ A QUALIDADE FÍSICA DO SOLO .....	48
2.1 INTRODUÇÃO .....	50
2.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	51
2.3 RESULTADOS .....	55
2.3 DISCUSSÃO .....	60
2.4 CONCLUSÕES .....	64
2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64
CAPÍTULO III - O FEIJÃO GUANDU ( <i>Cajanus cajan</i> ) AUMENTA A FERTILIDADE DO SOLO EM TERRAS PRETAS ARQUEOLÓGICAS .....	68
3.1 INTRODUÇÃO .....	70
3.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	71
3.3 RESULTADOS .....	75
3.4 DISCUSSÃO .....	90

3.5 CONCLUSÕES .....	93
3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	93
CAPÍTULO IV: O TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA REDUZ A PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO EM SOLOS ANTROPOGÊNICOS .....	97
4.1 INTRODUÇÃO .....	99
4.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	100
4.3 RESULTADOS .....	105
4.4 DISCUSSÃO .....	110
4.5 CONCLUSÕES .....	113
4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	113
5.1 CONCLUSÃO GERAL.....	116
5.2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA GERAL.....	117

## CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES GERAIS

### 1.1 INTRODUÇÃO GERAL

Na região Amazônica, são encontrados em pontos distintos, os solos antrópicos denominados Terra Preta Arqueológica (TPA), Terra Preta de Índio (TPI) ou simplesmente Terra Preta. Este solo, contém altos valores de pH, nutrientes e carbono orgânico em relação aos solos predominantes na Amazônia, os Latossolos e Argissolos, que são caracterizados pela baixa fertilidade natural.

A compreensão das relações entre as sociedades indígenas do passado e o meio ambiente é de grande relevância na descrição dos processos de formação das terras pretas. A formação das TPAs ainda não é bem elucidada, possivelmente, estes solos originaram-se pelas atividades, não intencionalmente, pelo homem pré-colombiano (KERN; KÄMPF, 1989). Pesquisas recentes realizadas em assentamentos abandonados de índios identificaram extensas áreas cheias de fragmentos cerâmicos (OLIVEIRA *et al.*, 2015a) e terra preta com altos valores de carbono orgânico (CAMPOS *et al.*, 2012) em comparação a outros solos. Em estudos com caracterização física e química de terras pretas arqueológicas, Campos *et al.* (2011), relatam que as TPAs, são de coloração escura e com presença de fragmentos cerâmicos e contêm artefatos indígenas incorporados à matriz dos horizontes superficiais do solo. Estes mesmos autores, afirmam que estes são os principais critérios para reconhecer e delimitar um solo de TPA.

Do ponto de vista químico, sabe-se que as TPAs são superiores aos outros tipos de solos da Amazônia. Barros *et al.* (2012), em estudo com fracionamento químico da matéria orgânica em vários sítios de TPAs, constataram os elevados teores de matéria orgânica. Da mesma maneira, Moline e Coutinho (2015), ao analisar os atributos químicos das áreas de mata nativa e cultivadas, constaram que o solo de Terra Preta, mostrou os melhores índices de fertilidade.

A exploração dos solos na Amazônia foi realizada por décadas de forma extrativista sem significativos impactos ambientais (KERN; KÄMPF, 1989). Todavia, nos últimos anos a abertura de novas áreas na Amazônia para a agricultura e pecuária foram intensificadas, acelerando a redução expressiva do teor de matéria orgânica depositada nas camadas superficiais, causando alterações negativas na disponibilidade de nutrientes e na degradação do solo (BARROS *et al.*, 2012; MOLINE; COUTINHO, 2015).

A mudança da cobertura vegetal de floresta para pastagem ou atividade agrícola, promove uma série de alterações nos atributos do solo, conforme os seguintes trabalhos:

aumento da resistência do solo à penetração (SOARES *et al.*, 2016); maior agregação, devido a compactação do solo pela maior pressão recebida com o pisoteio animal (OLIVEIRA *et al.*, 2015a); redução do estoque de nutrientes em áreas de lavouras em relação à mata nativa em Rondônia (MAGALHÃES *et al.*, 2013).

Conversão de áreas de florestas amazônicas em pastagem, resulta na quantidade e qualidade da biomassa aérea (FEARNSIDE; BARBOSA, 1998). Nesse sentido, a conversão de áreas de vegetação natural em pecuária é uma preocupação crescente, especialmente quando se trata de ambientes frágeis ou redutos florestais (CARDOSO *et al.*, 2011). Devido à expansão da atividade pecuária, na região sul do Amazonas um dos usos atualmente das TPAs é a pastagem. Aproximadamente 75% das áreas desmatadas na Amazônia foram ou estão sendo utilizadas como pastagens (CERRI *et al.*, 2008). Em estudos com atributos físicos do solo em área de TPA sob pastagem, Soares *et al.* (2015), verificaram valores acentuados de densidade do solo, microporosidade e resistência do solo à penetração.

Nas condições de alta precipitação e fragilidade dos solos do trópico úmido, o uso do plantio direto em solo coberto é a principal prática recomendada para garantir a sustentabilidade. Na região Amazônica a cobertura do solo por meio da cultura do feijão guandu, tornou-se uma alternativa para melhor aproveitamento de áreas já desmatadas. Neste sentido, a implantação da cultura do feijão guandu sobre TPA é ideal para o desenvolvimento e produtividade da cultura, uma vez que esta apresenta alta fertilidade natural. Considerando que as TPAs apresentam características químicas que favorecem o cultivo de subsistência e que tem sido utilizada para agricultura familiar. De modo geral, Favero *et al.* (2001), afirmam que a utilização de plantas de cobertura promove melhorias na qualidade do solo, podendo favorecer plantas espontâneas com maior capacidade de ciclagem de nutrientes e produção de biomassa.

A qualidade física do solo exerce importante função nos estudos de indicadores de sustentabilidade, pois apresenta influência direta nas reações químicas e biológicas ocorridas entre o sistema solo-planta e, ainda, manifesta-se em processos de retenção de água, resistência do solo à penetração, crescimento de raízes, liberação de calor e trocas gasosas com o meio (SOUZA *et al.*, 2012). Além desses, os indicadores químicos retratam atributos que são responsáveis pelos processos naturais do funcionamento do solo, como a matéria orgânica - que influencia a liteira e a biomassa microbiana, o pH - a disponibilidade de nutrientes - o conteúdo de nutrientes – e a produção de biomassa.

Com o uso e manejo das Terras Pretas Arqueológicas surge a preocupação da compactação do solo e seus efeitos sobre os aspectos físicos, químicos e biológicos, com reflexos na produtividade da cultura e nos aspectos ambientais da produção. Esse processo é

oriundo principalmente pela utilização de máquinas e animais para pastejo. Atualmente já existe uma preocupação com o aumento das áreas agrícolas com problemas de compactação, o que em grande parte se deve às operações mecanizadas realizadas sem considerar a umidade do solo e o pastejo sem considerar a capacidade suporte de animais (SOUZA *et al.*, 2006; ARAÚJO *et al.*, 2011; SOUZA *et al.*, 2014).

Pesquisas têm demonstrado claramente o efeito da compactação nos atributos físicos do solo (SILVA *et al.*, 1994; SOUZA *et al.*, 2012; NEVES JUNIOR *et al.*, 2013). A compactação aumenta a densidade do solo e a resistência do solo à penetração (SOUZA *et al.*, 2014) e diminui a porosidade total, tamanho e continuidade dos poros (SOUZA *et al.*, 2006). Reduções significativas ocorrem principalmente no volume de macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados.

A análise de compressibilidade do solo fornece informações sobre duas variáveis que podem ser utilizadas para a tomada de decisão do manejo mais adequado, uma delas é a tensão de preconsolidação, que reflete o valor máximo de carga que o solo pode suportar sem que haja uma compactação adicional e, a segunda é o coeficiente de compressão, que representa o decréscimo do volume de um solo quando este é submetido à aplicação de uma pressão externa (TORMENA *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2010). Portanto, para avaliar a susceptibilidade à compactação e o momento adequado para executar as operações mecanizadas no campo, atributos físicos e mecânicos do solo têm sido utilizados (SUZUKI *et al.*, 2008).

Alguns destes atributos relativos ao comportamento compressivo do solo são obtidos da curva de compressão, representado graficamente pela relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou índice de vazios. Adicionalmente, pode se citar também o índice de compressão e a pressão de preconsolidação (SILVA *et al.*, 2010; SOUZA *et al.*, 2012).

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) também é um atributo do solo sensível aos efeitos da compactação do solo, sendo sugerido como indicador de qualidade física do solo que influencia diretamente na produção das culturas (TORMENA *et al.*, 1998; CAVALIERI *et al.*, 2011; TORRES *et al.*, 2014). O IHO do solo engloba informações sobre resistência do solo à penetração, disponibilidade de água e aeração do solo (ROQUE *et al.*, 2011; LIMA *et al.*, 2012), indicando assim o conteúdo de água onde as limitações são mínimas ao desenvolvimento das culturas.

No Brasil, os estudos da modelagem do comportamento da estrutura do solo com base na pressão de preconsolidação, intervalo hídrico do solo são recentes requerendo a realização de mais pesquisas em diferentes condições de abordagem que busquem, investigar

as inter-relações dos mais variados atributos do solo que possam auxiliar na manutenção e sustentabilidade da estrutura dos solos agrícolas, independentemente dos sistemas de manejos utilizados.

Diversas pesquisas têm-se voltados à caracterização de áreas com Terras Pretas Arqueológicas na região sul do Amazonas. Aquino *et al.* (2016a), ao caracterizar cor e óxidos de ferro da fração argila em TPAs no município de Apuí, AM, verificaram que os óxidos de ferro são indicadores sensíveis de processos pedoambientais e pedogênicos das TPAs. Já Campos *et al.* (2012), observaram que nos locais com TPAs os atributos químicos e físico-químicos são mais elevados em relação aos solos não antropogênicos, conferindo-lhes maior fertilidade. Neste mesmo segmento, Santos *et al.* (2013), afirmam que TPAs apresentam teores altos a muito altos de fósforo disponível.

Contudo, poucos trabalhos se propuseram a verificar os atributos químicos e a qualidade física do solo em áreas de Terras Pretas Arqueológicas sob diferentes manejos. Uma vez que o conhecimento dos atributos indicadores da qualidade do solo, especialmente em áreas de Terras Pretas Arqueológicas é fundamental, tanto para capacidade de produção das culturas, como também, nas funções ambientais importantes que desempenham.

Desta forma, a compreensão dos processos envolvidos na degradação física das TPAs permite a busca por sistemas de cultivos menos impactantes para as suas características. O uso entre os cultivos de feijão guandu e pastagem em terra preta arqueológica determina qual cultura vai proporcionar melhores condições de estrutura do solo, capacidade de suporte de carga e intervalo hídrico ótimo visando manter a conservação do solo quando comparado com TPA sob floresta natural.

## **1.2 HIPÓTESE**

A exploração de terra preta arqueológica com feijão guandu determina melhor estrutura do solo, capacidade de suporte de carga e intervalo hídrico ótimo quando comparado com a ocupação por pastagem (*Brachiaria brizanta*) tendo como referência a TPA sob floresta natural.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Geral**

Caracterização de atributos físicos, mecânicos e químicos do solo em Terras Pretas Arqueológicas em áreas cultivadas com TPA sob floresta natural, feijão guandu e pastagem.

### **1.3.2 Específicos**

Avaliar a variação espacial dos atributos químicos do solo em áreas cultivadas com feijão guandu e pastagem em Terras Pretas Arqueológicas comparativamente com área de TPA de floresta natural.

Modelagem do intervalo hídrico ótimo das áreas de feijão guandu e pastagem em Terras Pretas Arqueológicas comparativamente com área de TPA sob floresta natural.

Determinar a capacidade de suporte de carga do solo, obtendo medições da pressão de preconsolidação por meio de ensaio uniaxiais em diferentes condições de teor de água no solo em áreas de pastagem em Terras Pretas Arqueológicas comparativamente com área de TPA sob floresta natural.

## **1.4 Organização da Tese**

O primeiro capítulo foi realizado com finalidade de apresentar a importância do tema, por meio da introdução e justificativa, hipótese, objetivo geral e específicos, revisão bibliográfica, com o estado da arte de pesquisas clássicas e atuais do tema e, a metodologia geral utilizada na pesquisa. Os demais capítulos são apresentados em estrutura de artigos científicos, com o segundo capítulo relacionado a qualidade física do solo, curva de retenção e intervalo hídrico ótimo do solo em solos antropogênicos. O terceiro capítulo aborda a variação espacial dos atributos químicos do solo em terras pretas arqueológicas sob diferentes usos. O quarto capítulo que trata da modelagem da capacidade de suporte de carga do solo.

## 1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.5.1 Caracterização geral das terras pretas arqueológicas

Na região Amazônica predominam solos frágeis, seja quimicamente, no caso dos altamente intemperizados, como os Latossolos e Argissolos, os quais geralmente apresentam elevada acidez, saturação em Al e Mn trocáveis, associados a uma baixa concentração de nutrientes, principalmente P disponível,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ . Dos poucos solos com alta fertilidade, incluem-se a Terra Preta Arqueológica (TPA), Terra Preta de índio ou Terra Preta, a qual, representa um importante registro da ocupação humana e do uso do solo na Amazônia. Existe ainda, uma outra variante com similaridade com as TPAs, denominada de terra mulata, segundo Sombroek (1966), seriam os locais utilizados para atividade agrícola pré-histórica.

Definir terra preta é complicado, devido a variabilidade dos sítios arqueológicos e, por serem encontradas como manchas descontínuas, tais variações são justificadas por diferenças na ocupação dos assentamentos indígenas no passado. Alguns autores (GLASER 2004; SANTOS *et al.*, 2013;) caracterizam as TPAs, com um horizonte A antrópico (Au), de cor escura, com alto teor de matéria orgânica, presença de fragmentos cerâmicos e que contém artefatos arqueológicos do homem pré-colombiano.

Em relação a sua origem, muitos aspectos ainda não são elucidados, tendo sido formado provavelmente pelo homem pré-colombiano (KERN; KÄMPF, 1989). Moreira (2007), em estudo com fertilidade e matéria orgânica em vários sítios arqueológico no Amazonas, observou que a ação antrópica advinda da ocupação pré-colombiano ocasionou a manutenção do conteúdo de matéria orgânica em solos de TPA. Avaliando solos antropogênicos e solos adjacentes da Amazônia Central, Chagas *et al.* (2017), observaram que os solos antropogênicos mostraram maiores teores de carbono orgânico, nitrogênio total e maior fertilidade quando comparada com o Latossolo Amarelo, nas três camadas estudadas. No entanto, muitas dúvidas ainda permanecem, entre elas destacam-se a alta capacidade de manutenção da fertilidade como o uso contínuo da terra, mesmo nas condições edafoclimáticas locais.

De acordo com Gurjão *et al.* (2010), antes da ocupação humana os solos desses perfis deveriam constituir uma única unidade de solo, mas as atividades desenvolvidas pelos antigos habitantes da região durante longo período, ocasionaram mudanças nos horizontes superiores dessa unidade de solo.

A TPA pode ser encontrada em planícies de inundação (várzea e igapó) e terra firme, são distribuídas em manchas descontínuas por toda Amazônia, estando normalmente associadas aos cursos de água ou em áreas com posição topográfica que permita boa

visualização espacial (GERMAN, 2003). Em relação às dimensões das áreas de ocorrência, essas podem apresentar áreas de pequena ou grande extensão (1 a 500 ha) (KÄMPF; KERN, 2005). Essas dimensões dependem do período de assentamento do homem pré-histórico, áreas de grande extensão e profundas, as TPAs seriam oriundas de ocupação por longo período, por outro lado, sítios menores e menos profundos, possivelmente seriam de ocupação curtas.

Quanto aos atributos químicos, a TPA destaca-se, por sua fertilidade superior a outras classes de solos da Amazônia. Em estudos com caracterização de terras pretas arqueológicas no Sul do Amazonas, Santos *et al.* (2013), obteve elevados teores de carbono orgânico, matéria orgânica e pH entre 5,5 a 6,8. Da mesma forma, Silva *et al.* (2011a), em pesquisa com caracterização química de solos antrópicos na Amazônia Central, observaram elevados teores de P disponível,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  e  $Mg^{2+}$ . Assim, estes solos são frequentemente utilizados pelas populações locais para o cultivo de hortaliças, cereais, frutas, mandioca e legumes (KIM *et al.* 2007).

Com relação aos atributos físicos, os solos antropogênicos são bem drenados, com boa infiltração de água, textura arenosa, valores baixos de densidade e de resistência do solo à penetração e maior agregação. Trabalhos dessa natureza, têm comprovado essa afirmação, como Barros *et al.* (2016), ao pesquisar a distribuição da porosidade textural e estrutural em quatro sítios arqueológicos, seus resultados mostraram que apesar da variação de classes texturais, os sítios de TPA não diferiram em relação a porosidade e textura. Para Teixeira *et al.* (2009), apesar de normalmente apresentar fração areia em maior percentual que o provável solo original, pode apresentar grande variação entre os sítios de TPAs.

Ao avaliar os agregados e carbono orgânico do solo, em três sítios arqueológicos sob diferentes usos na região Sul do Amazonas, Gomes *et al.* (2017), constaram que o uso do solo, influenciou nos atributos avaliados, uma vez que, os valores mais altos de carbono orgânico, classes de agregados >2,00 mm e o diâmetro ponderado médio foram na camada de 0,00-0,05 m. Silva *et al.* (2016), também em pesquisa com agregados e carbono orgânico em área de TPA, verificaram que os elevados teores de carbono orgânico interferiram positivamente na densidade do solo e nos índices de agregação do solo.

Dessa maneira, os altos teores de carbono orgânico é uma característica singular dos solos antropogênicos, podendo concentrar até seis vezes mais que solos adjacentes, presumindo-se, maior efluxo de  $CO_2$  segundo Campos *et al.* (2016), mesmo em sítios arqueológicos, há diferenças de taxas de efluxo de  $CO_2$ .

Estudos voltados para mineralogia em TPAs foram realizados recentemente, podendo destacar: mineralogia e geoquímica de perfis de solo com Terra Preta Arqueológica

de Bom Jesus do Tocantins, sudeste da Amazônia (SILVA *et al.*, 2012); caracterização dos óxidos de ferro presentes em fragmentos cerâmicos de Terra Preta de Índio (MENEZES *et al.*, 2013); variação da concentração total de As em relação aos principais atributos químicos e mineralógicos, em um perfil de solo antropogênico e adjacente (LEMOS *et al.*, 2009).

Estudos realizados na região do médio Rio Madeira, Campos *et al.* (2011), encontraram minerais com dominância de caulinita e gibbsita, além de traços de mica. A maioria dos trabalhos de mineralogia das TPAs foi realizada em áreas de terra firme, onde são mais frequentemente identificados sítios arqueológicos. No entanto, foram identificados alguns sítios enterrados em ambiente de várzea (MACEDO, 2009; TEIXEIRA *et al.*, 2006).

Os maiores usuários das terras pretas arqueológicas são os pequenos produtores, que utilizam para produzir inúmeros tipos de alimentos, como: mandioca, melancia, milho e entre outras; as quais são produzidas em pequena escala (CAMPOS *et al.*, 2011).

Ao analisar a fertilidade das terras pretas arqueológicas na produção do mamão hawai na Amazônia Central, Falcão e Borges (2006) verificaram que entre os tratamentos, o que apresentou maior produção foi TPA, com média de 61,10 frutos/planta. Nesta mesma linha, Fraser *et al.* (2008) em estudo com o cultivo de mandioca em terras pretas na Amazônia Central, enfatizou que estudos dessa natureza em solos antropogênicos, são importantes, pois tem a finalidade de obter respostas sobre o período pré-colombiano.

Em relação às classes de solos, os sítios arqueológicos com TPA, podem ocorrer em Latossolos, Argissolos e Cambissolos (LIMA *et al.*, 2002) e ainda em Neossolos e Espodosolos, conforme afirmou Smith (1980), podendo estar em diferentes superfícies geomorfológicas.

### **1.5.2. Variabilidade espacial dos atributos do solo**

A caracterização da variabilidade horizontal dos atributos do solo representa importante atividade de pesquisa na compreensão de processos e fatores inerentes ao solo. Quando determinado atributo de solo varia de um local para outro, com algum grau de organização ou continuidade, expresso pela avaliação da dependência espacial, os resultados da estatística clássica são mais bem entendidos e aproveitados pela geoestatística.

De acordo com Almeida e Guimarães (2016), o comportamento dos atributos do solo pode ser determinado tanto por estatística clássica quanto por geoestatística, entretanto se os dados não revelam uma variação completamente aleatória, a geoestatística torna-se uma ferramenta imprescindível para descrever o comportamento desses atributos na área. Adicionalmente, Aquino *et al.* (2014a) consideram que as técnicas geoestatísticas fornecem

informações essenciais para compreensão da distribuição espacial, pois possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem, da mesma maneira que, permite conhecer a continuidade de uma variável de interesse.

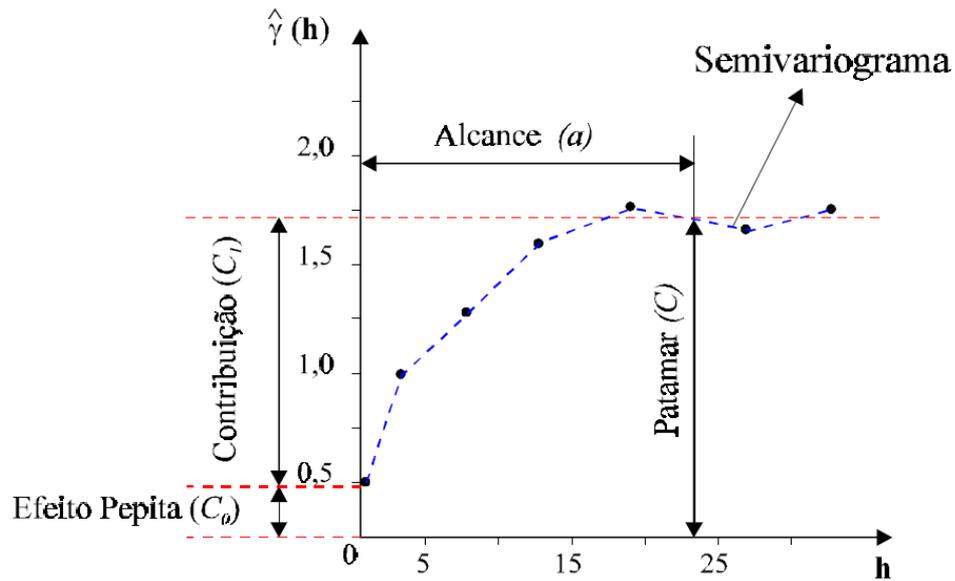
Segundo Cambardella *et al.* (1994), a variabilidade dos atributos físicos do solo pode ser de origem intrínseca ou extrínseca. A variabilidade intrínseca possui forte dependência espacial, sendo causada por alterações naturais no solo, notadamente aquelas de origem pedogenética, como: material de origem, intemperismo de minerais, acúmulo de matéria orgânica e outros. A variabilidade extrínseca possui menor dependência espacial, sendo causada por alterações no uso do solo, como: práticas culturais, espécie vegetal explorada, erosão e compactação etc.

A variação espacial possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem. Na literatura essa definição varia muito, conforme Resende *et al.* (2014), Aquino *et al.* (2015) e Soares *et al.* (2015), que usaram 121, 70 e 88 pontos, respectivamente, no estudo de diversos atributos físicos e químicos do solo, tais como: densidade do solo, resistência do solo à penetração, textura do solo, pH, matéria orgânica e fósforo.

Na avaliação da geoestatística, o semivariograma é o seu principal componente e também a ferramenta mais importante nas aplicações em Ciência do Solo. Segundo Vieira (2000), todos os cálculos de geoestatística dependem do modelo estimado (ajustado) do semivariograma. Por isso, se o modelo ajustado não possuir boa qualidade de estimação, a krigagem (os mapas) também estará com qualidade comprometida.

O semivariograma é o gráfico gerado pela função semivariância que representa a variabilidade espacial em função da distância numa determinada direção (Figura 1).

Figura 1 - Semivariograma experimental, conforme, Camargo (1996).



Calculado o semivariograma para um determinado atributo com o uso, pode-se definir alguns parâmetros de análises gerados a partir de modelos ajustados (Figura 1): amplitude ( $a$ ): conhecida também com o alcance ou “*range*”, é a distância de máxima correlação espacial entre as amostras coletadas em pontos espacialmente distribuídas, ou seja, a partir da qual as amostras passam a ser independentes. A semivariância cresce em função de  $h$  até um determinado ponto onde não se observa mais a continuidade espacial (VIEIRA, 2000).

Patamar ( $C+C_0$ ): também chamada de “*sill*”, é o valor no qual o semivariograma estabiliza-se. Isso se deve ao fato que, a partir desse ponto, as amostras tornam-se independentes devido à grande distância de separação entre elas (VIEIRA, 2000). Efeito Pepita ( $C_0$ ): é o valor da função semivariograma para distância zero, ou seja, amostras coletadas no mesmo ponto. Geralmente é atribuída a erros de amostragem e/ou de análise. Reflete a variabilidade dos dados não explicada em função da distância de amostragem utilizada (CAVALCANTE *et al.*, 2007).

De acordo com Lemos Filho *et al.* (2008), umas das grandes aplicações da geoestatística é a possibilidade de construção de mapas temáticos que permitam analisar a variável em estudo, por meio da técnica de krigagem, que faz uso da interpolação com o uso de estimadores não tendenciosos de variáveis regionalizadas, utilizando, para tanto, as propriedades estruturais do semivariograma e do conjunto inicial de dados amostrais. Recentemente, Lemos Filho *et al.* (2017) mostrou que a Krigagem é uma relevante ferramenta para o conhecimento da dinâmica espacial da densidade do solo e da matéria orgânica, podendo ser utilizada na tomada de decisão, para a conservação e manutenção da qualidade dos recursos naturais.

A elaboração de mapas temáticos dos atributos do solo, é possível visualizar a variabilidade, distribuição e concentração dos atributos em estudo. Partindo desse princípio, nos últimos anos, tem sido prática constante trabalhos com mapas nos mais diversos ambientes, os quais, pode-se citar: variação espacial do teor de matéria orgânica em pastagem (SILVA NETO *et al.*, 2012), variabilidade espacial dos atributos de fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro (ZONTA *et al.*, 2014); variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associado ao microrrelevo (ARTUR *et al.*, 2014), variabilidade espacial de atributos físicos do solo e do arroz cultivado sob plantas de cobertura em sistema de integração lavoura-pecuária (TREVISAN *et al.*, 2017), variabilidade espacial de atributos físicos do solo em terra preta de índio sob cultivo de café conilon (MOTA JÚNIOR *et al.*, 2017).

No tocante à geoestatística, esta ferramenta pode ser utilizada para a caracterização da variabilidade espacial e estimação de atributos do solo nos mais distintos ambientes amazônicos. Muitos trabalhos realizados no sul do Amazonas são baseados em levantamentos generalizados, em um dos trabalhos pioneiros com variação espacial na Amazônia, Novaes Filho *et al.* (2007), enfatizou que estudos detalhados sobre solos amazônicos, pode ser uma alternativa para tentar barrar a substituição das florestas tropicais por sistemas agropecuários.

Investigações enfocando a variabilidade espacial dos atributos de solos às mais diversas formas de paisagem na região Sul do Amazonas, foram abordadas por vários pesquisadores. Oliveira *et al.* (2015b), avaliando a variabilidade espacial dos atributos físicos do cambissolo sob cultivo de mandioca no sul do Amazonas, observaram que todos atributos apresentaram dependência espacial de fraca a moderada, ressaltando uma grade maior entre os pontos. Já Aquino *et al.* (2016b), estudaram os atributos químicos por meio das técnicas multivariadas e geoestatísticas em área com agrofloresta e cana-de-açúcar em Humaitá-AM e, observaram que a variação espacial foi de fraca a moderada em ambas as áreas.

Por outro lado, Oliveira *et al.* (2013), investigando a variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, concluíram que os atributos físicos do solo nos diferentes usos estudados apresentaram dependência espacial. Em ambiente de agrofloresta, Campos *et al.* (2013) analisaram a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo. Alho *et al.* (2014), em estudos de comparação dos atributos do solo entre os ambientes de campo natural e floresta na região de Humaitá, AM, observaram similaridade entre as áreas estudadas para a estabilidade dos agregados, carbono orgânico e estoque de carbono.

Os trabalhos com análise espacial dos atributos do solo em áreas de Terras Pretas Arqueológicas são poucos e escassos, podendo destacar: Aquino *et al.* (2014a e b), que propôs verificar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo antropogênicos e não

antropogêncios na região de Manicoré-AM e, concluíram que os valores de alcance encontrado nas duas áreas foram acima do utilizado na malha, evidenciando maior continuidade espacial nos ambientes. Neste mesmo segmento, Soares *et al.* (2015) com variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem, verificaram o aumento da densidade do solo, microporosidade e resistência do solo à penetração em superfície. Em estudo com análise geoespaciais dos atributos físicos, em Cambissolo e Argissolo de mata nativa em Humaitá, AM, Alho *et al.* (2016), relataram que o Argissolo do fragmento florestal apresentou maiores alcances e conseqüente maior continuidade geoespacial correlacionada aos atributos físicos avaliados.

Em pesquisa de caracterização do solo sob diferentes usos na região Sul do Amazonas, Oliveira *et al.* (2015a), observaram que entre os sete manejos em estudo, a área de Terra Preta Arqueológica, apresentou melhor agregação no solo e, maior relação aos atributos químicos, o que confere maior fertilidade.

Vale ressaltar, que a região de Novo Aripuanã, está inserida no chamado “Arco do Desmatamento” faixa que se estende do Maranhão até Rondônia (COHEN *et al.*, 2007) e onde encontram-se muitos sítios de Terras Pretas Arqueológicas, alguns profundamente alterados por práticas agropecuárias e florestais.

### **1.5.3 Atributos do solo na avaliação do manejo de áreas agrícolas**

O uso do solo na agricultura após a retirada da vegetação natural, tem frequentemente mostrado alterações nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, que são afetados pelo clima, tipo de cultura e práticas culturais adotadas. Nas últimas décadas tem-se notado uma tendência mundial de intensificação da produção agrícola. Para isso, são adotadas técnicas de cultivo como a seleção de culturas com produtividades elevadas, uso de altas doses de adubos minerais e uso indiscriminado de agrotóxicos.

De acordo com Melo e Marques (2000) as regiões tropicais e subtropicais, onde os solos são altamente intemperizados, ácidos e os minerais secundários apresentam baixa capacidade de troca de cátions, a adição de material orgânico tem importância fundamental para a manutenção da fertilidade. A qualidade estrutural do solo refere-se ao arranjo das partículas do solo constituindo um ambiente dinâmico, cuja alteração determinará um novo comportamento dos processos que ocorrem no solo (FERREIRA, 2010). A estrutura é boa indicadora da qualidade do solo devido a sua sensibilidade às práticas de manejo adotadas. Dos componentes do manejo o preparo do solo talvez seja a atividade que mais exerce influência

nos atributos indicadores da qualidade física do solo, pois atua diretamente na sua estrutura (HAMZA; ANDERSON, 2005).

A utilização dos diferentes sistemas de manejo proporciona principalmente alterações na estrutura do solo. Em longo prazo, segundo Lima *et al.* (2013), tal aspecto pode estar associado à formação de camadas compactadas. Em estudo com o impacto do preparo do solo no sulco de plantio em relação ao carbono orgânico e atributos físicos do solo, Shi *et al.* (2012), consideram que a compactação pode elevar a densidade e reduzir o volume de poros no solo, o que resultariam em aumento da erosão, redução na condutividade hidráulica e diminuição do alongamento radicular das plantas.

Em estudos conduzidos por Oliveira *et al.* (2015a), na avaliação da qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejos em solos amazônicos, observaram que os sistemas de manejo agrícola alteraram a qualidade física do solo elevando a densidade e resistência do solo à penetração e reduzindo o volume de poros.

O conceito de qualidade física do solo engloba o conhecimento de propriedades e processos relativos à habilidade do solo em manter efetivamente os serviços ambientais ou cujo estudo é realizado por meio de indicadores físicos da qualidade do solo responsáveis pela avaliação da sua estrutura. Para Singer e Ewing (2000), os atributos mais utilizados como indicadores de qualidade física do solo deveriam ser aqueles que consideram a profundidade efetiva de enraizamento, porosidade total, distribuição e tamanho dos poros, distribuição do tamanho das partículas, densidade do solo, resistência do solo à penetração das raízes, intervalo hídrico ótimo, índice de compressão e estabilidade dos agregados.

Contudo, há outros indicadores de qualidade física do solo, como a curva de retenção de água do solo, a condutividade hidráulica, a porosidade, o ponto de inflexão e as características de retenção de água do solo, que tornam o processo de avaliação da qualidade física mais simples, rápido e menos complexo (SANTOS *et al.*, 2011).

Outro atributo do solo que merece ser destacado é a estabilidade de agregados. A agregação do solo pode ser resultado da ação de união mecânica por células e hifas dos organismos, dos efeitos cimentantes dos produtos derivados da síntese microbiana ou da ação estabilizadora dos produtos de decomposição que agem individualmente ou em combinação (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011).

A agregação do solo pode sofrer alterações permanentes ou temporárias, demonstrando variação cíclica provocada por práticas de manejo de solo e culturas. Trabalhando com a estabilidade de agregados e matéria orgânica do solo em Cambissolo em área de cana-de-açúcar, Oliveira *et al.* (2013), afirmaram haver relação espacial entre o DMG,

DMP e classes de agregados (>2,00 e 2,00-1,00 mm). Por outro lado, em estudo com a estabilidade dos agregados e estoque de carbono do solo em Cambissolo e Argissolo, Alho *et al.* (2014), verificaram que os valores de estoque de carbono, nas diferentes profundidades, mostraram-se mais favorecidos pelos teores de COT que em razão dos diferentes níveis de adensamento dos solos estudados.

Em estudo para se avaliar a agregação e estoques de carbono sob diferentes práticas de manejo agrícola, Vezzani e Mielniczuk (2011), verificaram recuperação da agregação do solo e estoques de carbono próximo das condições naturais de campo nativo, com o uso e manejo de sistemas de culturas por 15 a 17 anos, sem revolvimento do solo associado ao incremento de carbono. Costa *et al.* (2009) observaram que o revolvimento do solo com arado e grade ou escarificador reduz o teor de carbono de compostos orgânicos, a estabilidade de agregados, a densidade e a capacidade de campo, porém, aumenta a porosidade total, a macroporosidade e a capacidade de aeração em comparação com o sistema de plantio direto. Dantas *et al.* (2012) por sua vez, concluíram que o cultivo anual resulta em maior degradação física do solo, se comparado ao cultivo perene, em função da redução na condutividade hidráulica no solo e na estabilidade de agregados maiores que 2,0 mm, com elevação nos valores de densidade do solo.

Alguns indicadores químicos e físicos do solo podem ser usados para diagnosticar a sua capacidade em promover o desenvolvimento das plantas, mantendo a sua produtividade e a qualidade ambiental (MARTINAZZO, 2006). A influência da matéria orgânica na agregação do solo é um processo dinâmico, sendo necessário o acréscimo contínuo de material orgânico para manter a estrutura adequada ao desenvolvimento das plantas.

A matéria orgânica (MO) é considerada o fator de maior importância na determinação da qualidade do solo, por ser sensível às práticas de manejo do solo, em virtude de sua suscetibilidade de alteração em relação às práticas de manejo e por correlacionar-se com a maioria dos atributos do solo (MIELNICZUCK, 1999), podendo ser avaliada por meio do teor de carbono orgânico total. Pesquisadores consideram a MO um dos melhores indicadores de qualidade do solo, fundamentando-se na relação de várias funções e processos biológicos, físicos e químicos que ocorrem no solo estarem relacionados diretamente com a presença de matéria orgânica.

Os indicadores químicos cujas alterações se dão rapidamente no tempo de acordo com o manejo são: acidez, a disponibilidade de nutrientes, a capacidade de troca de cátion (CTC), saturação por alumínio e saturação por bases, são os mais utilizados em estudos realizados em curto espaço de tempo, em função de seus reflexos imediatos a forma de uso do

solo e a ferramenta mais utilizada para esse diagnóstico tem sido a análise do solo (MARTINAZZO, 2006).

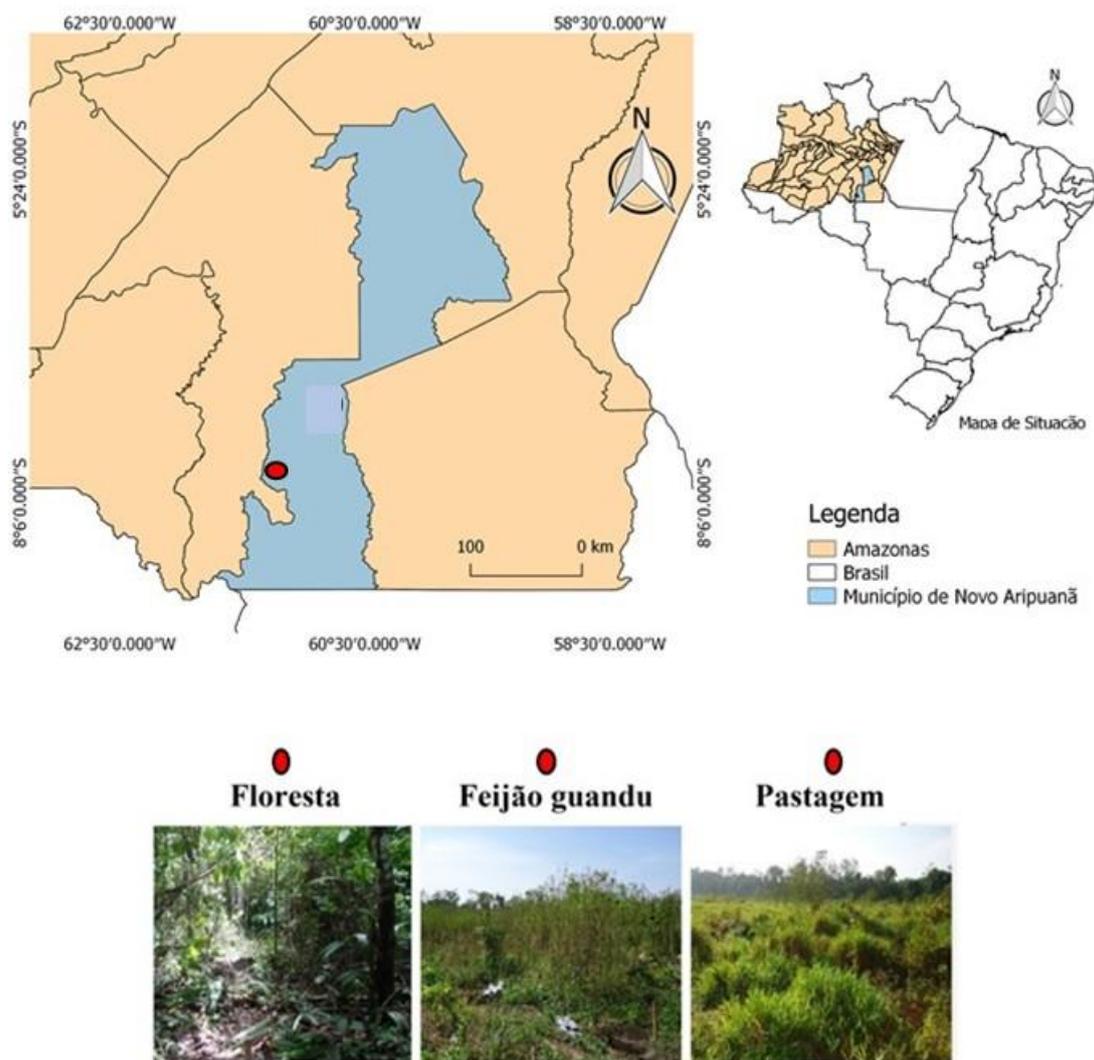
Para Chaves *et al.* (2005), um solo pode ser considerado fértil, quando, além de conter quantidades suficientes e em proporções adequadas dos nutrientes essenciais às plantas e livre de elementos tóxicos, apresentar, também, atributos físicos satisfatórios. Segundo Coelho e Verlengia (1973), com exceção do pH dos solos, os atributos químicos apresentam maior variação do que os atributos físicos dos solos.

## 1.6 METODOLOGIA GERAL

### 1.6.1 Localização e caracterização das áreas de estudo

A área de estudo está localizada no município de Novo Aripuanã, região sul do Amazonas, Brasil, situado ao longo da rodovia Transamazônica, BR-230, com coordenadas geográficas de 07°51'30" de latitude sul e 61°18'01" de longitude oeste (Figura 2). O clima da região é o tropical chuvoso, apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade média parcial varia entre 2.250 e 2.750 mm ao ano, com período chuvoso entre outubro e junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25 e 27 °C e a umidade relativa do ar entre 85 e 90% (BRASIL, 1978).

Figura 2 - Localização dos ambientes de Terra Preta Arqueológica sob os respectivos usos em Novo Aripuanã, Amazonas.

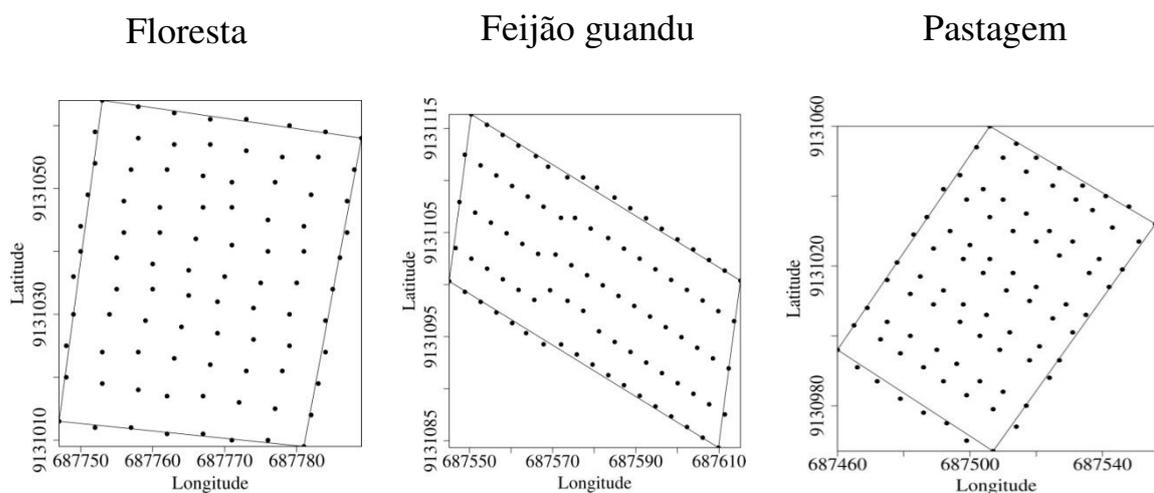


A região apresenta relevo marcado pela presença de platôs nas partes mais elevadas e por planície nas partes mais baixas, que tem como principais características a presença de uma superfície pediplanada, localmente interrompida por colinas de topo plano (CPRM, 2001). O solo foi classificado como Latossolo Amarelo eutrófico argissólico, segundo SiBCS (EMBRAPA, 2013).

Foram selecionadas três áreas de estudos sobre Terra Preta Arqueológica, submetidas aos seguintes usos: mata nativa (Floresta Amazônica) sendo preservada a mais de vinte e cinco anos com árvores secundárias de grande porte, entre quinze e vinte metros de altura; pastagem brachiaria (*Brachiaria brizanta*); feijão guandu (*Cajanus cajan*), estando coberta com várias plantas trepadeiras nativas, ressaltando que nos últimos 25 anos, as duas últimas áreas, foram cultivadas com milho, feijão e melancia.

Para a coleta dos dados, foram construídas grades amostrais, com 88 pontos para floresta e pastagem cada e, 90 pontos amostrais para o feijão guandu (Figura 3). As malhas tinham as seguintes dimensões: 2.500 m<sup>2</sup> para a floresta, 1.700 m<sup>2</sup> para o feijão guandu e 4.800 m<sup>2</sup> para a pastagem, com espaçamentos entre os pontos de 6 x 6 m, 4 x 5 m e 8 x 8 m, respectivamente. A escolha das dimensões das malhas foi definida no campo, conforme avaliada as dimensões da área de TPA e a respectiva cobertura representativa do solo. Todos os pontos foram georreferenciados com um equipamento de GPS.

Figura 3 - Representação das malhas amostrais e pontos de coleta nas áreas de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas.



### 1.6.2. Metodologia de Campo

A amostragem foi realizada em trincheiras confeccionadas nas intersecções das malhas, sendo coletada uma amostra por ponto, nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m para análise dos atributos químicos e, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, para determinar o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e curva de retenção de água (CRA). Nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m foram coletadas amostras indeformadas para a capacidade de suporte de carga do solo. As amostras foram revestidas por filme plástico, com a finalidade de preservar a estrutura do solo.

Tabela 1 - Caracterização granulométrica das áreas de estudo nas áreas de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas.

Manejos	Areia	Silte	Argila
	g kg <sup>-1</sup>		
	0,00-0,05 m		
Floresta	701,10	203,40	95,50
Feijão	732,50	194,90	72,60
Pastagem	741,40	180,50	78,10
	0,05-0,10 m		
Floresta	701,34	195,89	102,77
Feijão	768,73	145,22	86,07
Pastagem	745,19	173,70	81,11
	0,10-0,20 m		
Floresta	718,74	194,02	87,24
Feijão	764,95	137,64	97,41
Pastagem	762,22	146,61	91,17

Figura 4 - Coleta dos anéis volumétricos em terras pretas arqueológicas em diferentes usos no município de Novo Aripuanã, Amazonas.



Figura 5 - Coleta de solo nas áreas de estudo em terras pretas arqueológicas em diferentes usos no município de Novo Aripuanã, Amazonas.



Figura 6 - Coleta das amostras (corpo de prova) para análise da pressão de preconsolidação em terras pretas arqueológicas em diferentes usos no município de Novo Aripuanã, Amazonas.



Figura 7 - Áreas de estudo (pastagem, feijão guandu e floresta) em Novo Aripuanã, Amazonas.



### 1.6.3 Análises físicas do solo

a) Curva de retenção: foi obtida em mesa de tensão e câmaras de pressão de Richards com placas porosas. As amostras foram submetidas às tensões de 2, 4, 6 e 10 kPa numa mesa de tensão e 20, 33, 50, 75, 100, 300, 500, 700 e 1.500 kPa em extrator de Richards. As curvas de retenção de água no solo foram ajustadas pelo modelo proposto por van Genuchten (1980), utilizando o *software* Soil Water Retention Curve (DOURADO-NETO *et al.*, 2001).

b) Densidade e porosidade do solo: a densidade do solo foi calculada pela relação entre a massa do solo seco em estufa a 105 °C e volume da amostra, segundo metodologia da Embrapa (2017). A porosidade foi calculada a partir da mesa de tensão e a microporosidade corresponderá à umidade volumétrica da amostra submetida a uma tensão de 0,006 MPa, após saturação (EMBRAPA, 2017). A porosidade total foi obtida segundo Embrapa (2017) e a macroporosidade por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

c) Estabilidade de agregados: os índices de estabilidade de agregados foram determinados de acordo com o método determinado por Kemper e Chepil (1965), obtendo os agregados por meio do peneiramento das amostras em vibrador Prooutest, utilizando os agregados que passaram pela peneira de 9,52 mm e que ficaram retidos na peneira de 4,76 mm. Após serem secos ao ar, os agregados foram saturados por dez minutos e posteriormente levados ao conjunto de peneiras para o peneiramento em água por 30 minutos. Foram utilizadas

cinco peneiras com os diâmetros de 4,76; 2,0; 1,0; 0,5 e 0,25 mm, para obtenção das seguintes classes de agregados C<sub>1</sub> (9,52-4,76 mm), C<sub>2</sub> (4,76-2,0 mm), C<sub>3</sub> (2,0-1,0 mm), C<sub>4</sub> (1,0-0,5 mm), C<sub>5</sub> (0,5-0,25 mm) e C<sub>6</sub> (< 0,25 mm).

d) Teor de água no solo e resistência do solo à penetração: as medições foram realizadas no mesmo dia, buscando-se, dessa forma, eliminar o efeito da variação do teor de água no solo, que foi determinado pelo método gravimétrico em amostras deformadas (EMBRAPA, 2017). Na determinação da resistência do solo à penetração, amostras indeformadas de solo em anéis foram coletadas e essas medidas foram tomadas por meio de um penetrômetro eletrônico estático de laboratório com velocidade constante de penetração de 0,01 m min<sup>-1</sup>, registro de uma leitura por segundo, cone com semiângulo de 30° e área de 3,14 cm<sup>2</sup>, equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kgf acoplada a um microcomputador para aquisição dos dados, conforme descrito por Tormena *et al.* (1998).

e) Intervalo hídrico ótimo: no laboratório, as amostras foram preparadas e saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água pura em uma bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura dos anéis. Em seguida, foram submetidas a diferentes tensões ( $\Psi$ ) 2, 6, 8, 10, 33, 100, 500 e 1.500 kPa, em câmaras de Richards com placas porosas (SILVA *et al.*, 1994). Após atingirem o equilíbrio em cada tensão, as amostras foram pesadas e foi determinada a resistência do solo à penetração, em laboratório, em três pontos para cada amostra, utilizando-se um penetrômetro eletrônico marca Marconi, modelo MA-933, com velocidade de deslocamento constante de 1,0 cm min<sup>-1</sup>, equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4,0 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30°, receptor e interface acoplado a um computador, para registro das leituras por meio de um *software* próprio do equipamento.

Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105 °C até massa constante. O teor de água no solo em base volumétrica foi quantificado pelo quociente do volume de água retida na amostra em cada tensão e o volume do solo de cada amostra. A densidade do solo foi obtida pela relação massa de solo seco e volume do cilindro (EMBRAPA, 2017).

Os dados de resistência do solo à penetração foram ajustados em função da densidade do solo e do teor de água no solo (Equação 1), usando o modelo não linear utilizado por Busscher (1990) e Leão *et al.* (2006):

$$RP = a \theta^b D_s^c \quad (1)$$

ou alternativamente:

$$\ln (RP) = \ln (a) + b (\ln \theta) + c (\ln D_s) \quad (2)$$

em que, RP = resistência do solo à penetração (MPa);  $D_s$  = densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ );  $\theta$  = conteúdo volumétrico de água do solo ( $m^3\ m^{-3}$ ); e “a”, “b” e “c” = coeficientes do modelo. Foi determinado o teor de água no solo para cada densidade na qual se atingiu resistência do solo à penetração ( $\theta_{RP}$ ) de 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa (SILVA *et al.*, 1994; SILVA *et al.*, 2011b).

A curva de retenção de água no solo, que relaciona o potencial matricial e a umidade volumétrica do solo, foi ajustada ao modelo utilizado por Tormena *et al.* (1998) e Leão *et al.* (2006), conforme Equação 3, utilizando-se o *software* SAS®:

$$\theta = \exp (d + e D_s) * y^f \quad (3)$$

ou alternativamente:

$$\ln (\theta) = \ln (a) + b * D_s + c \ln (y) \quad (4)$$

em que,  $\theta$  = conteúdo volumétrico de água ( $m^3\ m^{-3}$ );  $y$  = potencial matricial (MPa);  $d_s$  = densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ); “d” “e” “f” = coeficientes de ajuste do modelo. Assim, foi determinada a variação da umidade na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) na tensão de 0,01 MPa (HAISE *et al.*, 1955) e, no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ) na tensão de 1,5 MPa (SAVAGE *et al.*, 1996) em função da  $d_s$ .

A porosidade de aeração (PA) mínima foi de  $0,10\ m^3\ m^{-3}$ , considerada o valor mínimo responsável por uma taxa de difusão adequada de oxigênio da atmosfera até as raízes (DEXTER, 1988). O teor de água no solo considerando a PA ( $\theta_{PA}$ ) foi calculado pela equação 5:

$$\theta_{PA} = \left[ 1 - \frac{D_s}{D_p} \right] \quad (5)$$

em que,  $\theta_{PA}$  = conteúdo volumétrico de água ( $m^3\ m^{-3}$ ), considerando uma porosidade de aeração de  $0,10\ m^3\ m^{-3}$ ;  $D_p$  e  $D_s$  = densidade de partículas ( $Mg\ m^{-3}$ ) e do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ), respectivamente. A densidade de partícula foi medida pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 2017).

Para determinar o IHO, foi utilizado o método descrito por Silva *et al.* (1994 e 2011b) e Tormena *et al.* (1998). Os valores de  $\theta_{RP}$ ,  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  foram linearizados, utilizando-se a transformação logarítmica. O limite superior do IHO foram  $\theta_{CC}$  e/ou  $\theta_{PA}$ , enquanto o limite

inferior foram  $\theta_{PMP}$  e/ou  $\theta_{RP}$ . A densidade do solo crítica ao crescimento e desenvolvimento das plantas ( $D_{SC}$ ) foi considerada como o valor de  $D_S$  em que o IHO foi igual a zero.

Na realização do cálculo do IHO, conforme Wu *et al.* (2003), podem ser quatro as possibilidades e que dependem dos valores de quatro parâmetros: quantidade de água na porosidade de aeração, na capacidade de campo, na resistência do solo à penetração e no ponto de murcha permanente. As possibilidades são: se  $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP})$ , então o  $IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$ ; se  $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP})$ , o  $IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP}$ ; se  $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP})$ , o  $IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP}$ ; e se  $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP})$  o  $IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP}$ .

f) Pressão de Preconsolidação ( $\sigma_p$ ): a determinação da  $\sigma_p$  foi feita a partir de ensaios de compressibilidade. Para esses ensaios, amostras indeformadas foram coletadas em anéis metálicos (0,067 m de diâmetro por 0,025 m de altura), em áreas de terra preta arqueológica sob diferentes usos (floresta natural, feijão guandu e pastagem), nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m. Antes de serem levadas ao consolidômetro, as amostras foram equilibradas a 5 teores de água, sendo o primeiro e o último,  $0,05 \text{ kg kg}^{-1}$  e umidade de saturação, respectivamente.

Depois de equilibradas, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial em um consolidômetro automatizado com interação homem máquina (IHM), modelo CNTA-IHM/BR-001/07 (SILVA *et al.*, 2015). Os níveis de pressão aplicados ao corpo de prova foram: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, observando-se a pressuposição de Taylor (1971), que define a deformação máxima de até 90% do corpo de prova, para cada nível de pressão. Esta operação foi realizada automaticamente pelo equipamento, previamente configurado pelo usuário, o qual permite programação do tempo, níveis de pressão e a deformação máxima a ser alcançada pelo corpo de prova.

Os valores de pressão e deformação foram devidamente ajustados em um gráfico, obtendo-se, assim, a curva de compressão do solo (densidade do solo em função do logaritmo das pressões aplicadas). A partir da curva de compressão, foi estimado o índice de compressão ( $m$ ) e  $\sigma_p$ , observando a sugestão dos métodos  $M_1$  e  $M_3$ , propostos por Dias Junior e Pierce (1996).

Para a elaboração dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo, os valores de  $\sigma_p$  foram plotados em função da umidade volumétrica ( $\theta$ ) a que cada amostra foi submetida e, posteriormente, ajustados ao modelo (Equação 6), proposto por Dias Junior (1994). A partir desse modelo foi possível prever a pressão máxima que o solo pode suportar em função da umidade, sem que o mesmo venha a sofrer compactação adicional.

$$\sigma_p = 10^{(a + bU)} \quad (6)$$

sendo,  $\sigma_p$  = pressão de preconsolidação (kPa); U = umidade gravimétrica ( $\text{kg kg}^{-1}$ ); a e b = parâmetros de ajuste.

#### 1.6.4 Análises químicas do solo

As amostras de solo foram levadas ao laboratório, secas ao ar e em seguida passadas em peneira de 2,0 mm para análise química. Para as avaliações químicas, foram determinadas as seguintes variáveis:

O pH foi determinado potenciométricamente utilizando-se a relação 1:2,5 do solo: em água. Cálcio, magnésio e potássio trocáveis, assim como o fósforo disponível, foram extraídos utilizando-se o método da resina trocadora de íons (RAIJ *et al.*, 2001). A acidez potencial ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ) foi determinada por meio da extração com solução tamponada a pH 7,0 de acetato de cálcio, utilizando-se o método proposto pela Embrapa (2017). Com base nos resultados das análises químicas, foram calculadas a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por base (V%).

A matéria orgânica por sua vez, foi estimada por diferença, com base no carbono orgânico (Equação 7):

$$\text{MO} = 1,724 \times \text{CO} \quad (7)$$

em que, MO = matéria orgânica do solo; COT = teor de carbono orgânico total na camada amostrada ( $\text{g kg}^{-1}$ )

#### 1.6.5 Análise dos dados

Os atributos físicos e químicos do solo foram avaliados por meio da análise estatística descritiva, sendo calculados a média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose. A hipótese de normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, por meio do software Minitab.

A dependência espacial foi analisada por meio de ajustes de semivariogramas (VIEIRA, 2000), com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada pela Equação 8:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (8)$$

em que,  $N(h)$  = número de pares experimentais de observações  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$  separados por uma distância  $h$ . O semivariograma é representado pelo gráfico  $\hat{\gamma}(h)$  versus  $h$ . Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de  $\hat{\gamma}(h)$ , foram estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (efeito pepita,  $C_0$ ; patamar,  $C_0+C_1$ ; e o alcance,  $a$ ).

O grau de dependência espacial dos semivariogramas foi avaliado, segundo os intervalos propostos por Cambardella *et al.* (1994), em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm efeito pepita  $< 25\%$  do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e fraca,  $> 75\%$ .

Os modelos de semivariogramas considerados foram o esférico, exponencial, linear e gaussiano, sendo ajustados por meio do programa  $GS^+$  (versão 9.0) (ROBERTSON, 1998). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, foi considerado o menor valor da soma do quadrado do resíduo e maior valor do coeficiente de correlação e, avaliados pelo método de validação cruzada (cross-validate).

O ajuste e construção dos gráficos dos modelos de capacidade de suporte de carga foram realizadas por meio do *software* Sigma Plot 11.0, obtendo-se os parâmetros "a" e "b" (intercepto e ângulo de inclinação da reta, respectivamente), os quais possibilitaram estimar as pressões de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) para cada condição desse estudo. As comparações entre as equações obtidas de cada modelo das distintas condições deste estudo, foram realizadas pelo procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).

A análise de variância (ANOVA) foram realizados por meio do *software* SigmaPlot versão 11.0. Quando os resultados foram significativos, aplicou-se o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) para comparação entre as médias.

## 1.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, L. S.; GUIMARÃES, E. C. Geoestatística e análise fatorial exploratória para representação espacial de atributos químicos do solo, na cafeicultura. **Coffee Science**, Lavras, v.11, n.2, p.195-203, 2016.

ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.44, n.3, p.246-254, 2014.

ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P.; SOUZA, Z. M.; CUNHA, J. M.; SOARES, M. D. R. Atributos físicos e geoespaciais de Cambissolo e Argissolo de mata nativa em Humaitá, AM. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.32, n.2, p.422-430, 2016.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta Amazônica**, Manaus, v.41, n.1, p.103-114, 2011.

ARTUR, A. G.; OLIVEIRA, D. P.; COSTA, M. C. G.; ROMERO, R. E.; SILVAS, M. V. C.; FERREIRA, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associado ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.2, p.141-149, 2014.

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, I. A.; MANTOVANELI, B. C.; SOARES, M. D. R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.2, p.397-406, 2014a.

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JUNIOR, J.; SILVA, D. M. P. S.; SILVA, D. A. P. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênico e não antropogênico na região de Manicoré, AM. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.30, n.4, p.988-997, 2014b.

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

AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A. BAHIA, A.S.R.S.; SANTOS, L. A. C. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, Southern Amazonas. **Geoderma**, Amsterdam, v.262, n.1, p.35-44, 2016a.

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; OLIVEIRA, I. A.; FRANCISCON, U.; SILVA, D. M. P.; CUNHA, J. M. Atributos químicos do solo avaliados por técnicas multivariadas e geoestatísticas em área com agroflorestal e cana-de-açúcar em Humaitá-AM, Brasil. **Bioscience Jorunal**, Uberlândia, v.32, n.1, p.61-72, 2016b.

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

BARROS, R. M.; LIMA, H. V.; CANELLAS, L.P.; KERN, D. C. Fracionamento químico da matéria orgânica e caracterização de terra preta de índio. **Revista Ciência Agrária/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v.55, n.1, p.44-51, 2012.

BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V.; RODRIGUES, S.; KERN, D. C. Distribuição da porosidade textural e estrutural em solos de terra preta arqueológica. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.47, n.4, p.609-615, 2016.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.3, n.4, p.519-524, 1990.

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

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

CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; OLIVEIRA, I. A.; SANTOS, L. A. C.; AQUINO, R. E. Spatial variability of physical attributes in Alfissol under agroforestry, Humaitá region, Amazonas state, Brazil. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v.56, n.2, p.149-159, 2013.

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

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.5, p.1541-1549, 2011.

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FREITAS, D. A. F. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no pantanal Sul-Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.2, p.613-622, 2011.

CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Dinâmica da matéria orgânica do solo na Amazônia. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. Ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008, p.325-358.

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 Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p.1329-339, 2007.

- CHAGAS, L. F. B.; FALCÃO, N. P. S.; PADILHA, F. J.; OLIVEIRA, D. M.; GUIMARÃES, R. S.; CAMPOS, D. V. B.; MALVERDE, E. M.; FERREIRA, P. H. Z.; SOARES, R. Avaliação do impacto do cultivo de citros sobre os estoques de carbono e nitrogênio das frações leves da matéria orgânica de solos antrópicos (Terras Pretas de Índio) e solos adjacentes (Latosolos) da Amazônia Central. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v.9, n.5, p.2067-2081, 2017.
- CHAVES, L.H.G.; CHAVES, I.B.; VASCONCELOS, A.C.F.; LEÃO, A.B. Avaliação de potássio, matéria orgânica e fósforo em neossolos dos perímetros irrigados Engenheiro Arcoverde e São Gonçalo, PB. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.5, n.2, p.1-7, 2005.
- CPRM. Centro de Pesquisa de Recursos Minerais. **Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens**. Manaus, 2001. 93p. (Relatório Técnico).
- COHEN, J. C. P., BELTRÃO, J. C., GANDU, A. W., SILVA, R. R. Influência do desmatamento sobre o ciclo hidrológico na Amazônia. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v.59, n.3, p.36-39, 2007.
- COELHO, F. S.; VERLENGIA, F. **Fertilidade do solo**. 2. Ed. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. 1973.
- COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J.; MAFRA, A. L.; SILVA, F. R. Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.2, p.235-244, 2009.
- DANTAS, J. D. A. N.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ASSIS, C. P. Qualidade do solo sob diferentes usos e manejos no perímetro irrigado de Jaguaribe/Apodi, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.1, p.18-26, 2012.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.1, p.199-238, 1988.
- DIAS JÚNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Tese (Tese de Doutorado) – Michigan State University, East Lansing, 1994.
- DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.2, p.175-182, 1996.
- DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. **Soil Water Retention Curve (SWRC) software. versão 3.00 beta**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2001.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2013. 353 p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos**. 3ª edição revista e ampliada, Brasília: Embrapa, 573p. 2017.
- FALCÃO, N. P. S.; BORGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (*Carica papaya* L.). **Acta Amazônica**, Manaus, v.36, n.4, p.401-406, 2006.

FAVERO, C.; JUCKSCH, I.; ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M. Modificações na população de plantas espontâneas na presença de adubos verdes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.11, p.1355-1362, 2001.

FEARNSIDE, P. M.; BARBOSA, R. I. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.108, n.1-2, p.147-166, 1998.

FERREIRA, M. M. **Caracterização física do solo**. In: LIER, Q. J. van (ed.). Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.1-27.

FRASEN, J. A.; CLEMENT, C. R. Dark and manioc cultivation in Central Amazonia: a window on pre-columbian. **Boletim museu paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, Belém, v.3, n.2, p.175-194, 2008.

GERMAN, L.A. Historical contingencies in the coevolution of environment and livelihood: contributions to the debate on Amazonian Black Earth. **Geoderma**, Amsterdam, v.111, n.3-4, p.307-331, 2003.

GLASER, B; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. **Identifying the pre-columbian anthropogenic input on presente soil properties of Amazonian darks earths (terra preta)**. In Glaser, B; Woods, W. I. (Ed.) Amazonian Dark Earths. Exploration in space and time. Berlin: Springer, 2004, p.145-158.

GOMES, R. P.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; SILVA, D. M. P.; CUNHA, J. M.; FRANCISCON, U.; SILVA, L. S.; OLIVEIRA, I. A.; BRITO, W. B. M. Spatial variability of aggregates and organic carbon under three different uses od indies black earth in Southern Amazonas. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.33, n.6, p.1513-1522, 2017.

GURJAO, R. S.; LEMOS, V. P.; COSTA, M. L.; DANTAS FILHO, H. A.; DANTAS, K. G. F.; LIMA, W. T. S.; KERN, D. C. Comportamento do mercúrio em perfis de solos do sitio Ilha de Terra-Caxiuana, Pará. **Química Nova**, São Paulo, v.33, n.4, p 821-826, 2010.

HAISE, H.R.; HAAS, H.J.; JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity to 1/3-atmosphere percentage and “minimum point” as related to 15-26 atmosphere percentage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.34, n.1, p.20-25, 1955.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.82, n.2, p.121-145, 2005.

KÄMPF, N.; KERN, D. C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; CARDOSO, E. J. (Org.). **Tópicos em Ciência do solo**. 1 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.6, p.277-320, 2005.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, 1965. p.499-510.

KERN, D.C.; KÄMPF, N. Antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológicas na Região de Oriximiná, Pará. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, n.2, p.219-225, 1989.

KIM, J. S.; SPAROVEK, G.; LONGO, R. M.; MELO, W.J.; CROWLEY, D. Bacterial diversity of terra preta and pristine forest soil from the Western Amazon. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.39, n.2, p.684-690, 2007.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.88, n.1-2, p.279-285, 2006.

LEMOS, V. P.; COSTA, M. L.; GURJÃO, R. S.; KERN, D. C.; MESCOUTO, C. S. T.; LIMA, W. T. S.; VALENTIM, T. L. Comportamento do arsênio em perfis de solos do sítio Ilha de Terra de Caxiuanã, Pará. **Revista Escola de Minas**, v.62, n.2, p.139-146, 2009.

LEMOS FILHO, L. C. A.; OLIVEIRA, E. L.; FARIA, M. A.; LUIZ, A. B. A. Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.39, n.1, p.193-202, 2008.

LEMOS FILHO, L. C. A.; FERREIRA, L. L. N.; LYRA, D. L. Variabilidade espacial de atributos do solo indicadores de degradação ambiental em microbacia hidrográfica. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v.11, n.1, p.11-20, 2017.

LIMA, R. P.; LEON, M. J.; SILVA, A. R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa, v.60, n.1, p.16-20, 2013.

LIMA, V. M. P.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A. R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.1, p.71-78, 2012.

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

MACEDO, R. S. **Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos com horizonte antrópicos (Terra Preta de Índio) em áreas de várzea do rio Solimões – AM**. Manaus, AM 2009. (Tese de mestrado). Universidade Federal do Amazonas.

MAGALHÃES, S. S. A.; WEBER, O. L. S.; SANTOS, C. H.; VALADÃO, F. C. Estoque de nutrientes sob diferentes sistemas de uso do solo de Colorado do Oeste-RO. **Acta Amazônica**, Manaus, v.43, n.1, p.63-72, 2013.

MARTINAZZO, R. **Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2006. 83p. (Dissertação de Mestrado).

MENEZES, J. A.; SOUZA, W. B.; SANTANA, G. P. Caracterização de óxidos de ferro presentes em fragmentos cerâmicos de Terra Preta de Índio. **Scientia Amazônia**, Manaus, v.2, n.3, p.4-10, 2013.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O. **Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas**. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Eds.). Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p.109-114.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Genesis, 1999. p.1-8.

MOLINE, E. F. V.; COUTINHO, E. L. M. Atributos químicos de solos da Amazônia Ocidental após sucessão da mata nativa em áreas de cultivo. **Revista Ciência Agrária/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v.58, n.1, p.14-20, 2015.

MOTA JÚNIOR, P. C.; CAMPOS, M. C. C.; MANTOVANELLI, B. C.; FRANCISCON, U.; CUNHA, J. M. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em terra preta de índio sob cultivo de café conilon. **Coffee Science**, Lavras, v.12, n.2, p.260-271, 2017.

MOREIRA, D. Fertilidade, matéria orgânica e substância húmicas em solos antropogênicos da Amazônia Ocidental. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.2, p.307-315, 2017.

NEVES JUNIOR, A. F.; SILVA, A. P.; NORONHA, N. C.; CERRI, C. C. Sistemas de manejo do solo na recuperação de uma pastagem degradada em Rondônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.1, p.232-241, 2013.

NOVAES FILHO, J. P.; COUTO, E. G.; OLIVEIRA, V. A.; JOHNSON, M. S.; LEHMANN, J.; RIHA, S. S. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia Meridional. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.31, n.1, p.91-100, 2007.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região Sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.4, p.1103-1112, 2013.

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

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; SILVA, D. M. P.; CUNHA, J. M.; SOUZA, Z. M.; SOARES, M. D. R.; FREITAS, L. Spatial variability of physical attributes of cambisol under cassava cultivation in Southern Amazonas. **African Journal of Agricultural Research**, v.10, n.49, p.4414-4423, 2015b.

RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.

RESENDE, J. M. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; DANTAS, J. S.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. B. Variabilidade espacial de atributos de solos coesos do Leste Maranhense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.4, p.1077-1090, 2014.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; ARAÚJO, F. S.; SILVA, G. R. V. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico do solo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.9, p.1536-1542, 2011.

ROBERTSON, G.P. **GS<sup>+</sup> geostatistics for the environmental sciences: GS<sup>+</sup> user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152p.

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

SAVAGE, M. J.; RITCHIE, J. T.; BLAND, W. L.; DUGAS, W. A. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.4, p.844-851, 1996.

SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M.; SILVEIRA, P. M.; BECQUER, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.10, p.1339-1348, 2011.

SHI, X. H.; YANG, X. M.; DRURY, C. F.; REYNOLDS, W. D.; MCLAUGHLIN, N. B.; ZHANG, X. P. Impact of ridge tillage on soil organic carbon and selected physical properties of a clay loam in southwestern Ontario. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.120, p.1-7, 2012.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, R. B.; IORI, P.; LANÇAS, K. P.; DIAS JUNIOR, M. S. Modelagem e determinação do estado crítico de consolidação a partir da relação massa e volume em solos canavieiros. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v.33, n.1, p.376-3789, 2010.

SILVA, F. W. R.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; MOTTA, M. B.; SANTANA, R. M. Caracterização química e mineralogia de solos antrópicos (terras pretas de índio) na Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 673-681, 2011a.

SILVA, G. L.; LIMA, H. V.; CAMPANHA, M. M.; GILKES, R. J.; OLIVEIRA, T. S. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma**, Amsterdam, v.167-168, n.1, p.61-70, 2011b.

SILVA, A. K. T; GUIMARÃES, J. T. F.; LEMOS, V. P.; COSTA, M. L.; KERN, D. C. Mineralogia e geoquímica de perfis de solo com Terra Preta Arqueológica de Bom Jesus do Tocantins, sudeste da Amazônia. **Acta Amazonica**, Manaus, v.42, n.4, p.477-490, 2012.

SILVA NETO, S. P.; SANTOS, A. C.; LEITE, R. L. L.; DIM, V. P.; NEVES NETO, D. N.; SILVA, J. E. C. Variação espacial do teor de matéria orgânica do solo e produção de gramínea em pastagens de Capim-Marandu. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.28, n.1, p.41-53, 2012.

SILVA, R. B.; MASQUETTO, B. J.; LANÇAS, K. P.; SILVA, F. A. M. Desenvolvimento, automação e desempenho de um consolidômetro com interface homem-máquina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, n.2, p.416-427, 2015.

SILVA, D. M. P.; CAMPOS, M. C. C.; ALHO, L. C.; CUNHA, J. M.; PAULA NETO, P. Variação espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em área de terra preta arqueológica sob cultivo de cacau. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Pelotas, v.11, n.3, p.179-187, 2016.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8. ed. Ames: Iowa State University Press. 503 p, 1989.

SMITH, N. J. H. Anthrosol and human carrying capacity in Amazonia. In: Annals of the association of American Geographers, 70. **Anais...** Durham, 1980. p.553-566.

SINGER, M.; EWING, S. **Soil quality**. In: SUMNER, M. E. (Ed.). Handbook of soil science. Boca Raton: CRC Press, 2000. p.271-298.

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; SANTOS, L. A. C.; FONSECA, J. S.; SOUZA, Z. M. Atributos físicos do solo em áreas sob diferentes sistemas de usos na região de Manicoré, AM. **Revista Ciência Agrária/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v.59, n.1, p.9-15, 2016.

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M.; BRITO, W. B. M.; FRANCISCON, U.; CASTIONI, G. A. F. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista Ciência Agrária/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v.58, n.4, p.434-441, 2015.

SOMBROEK, W. G. **Amazonian soils**. A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon. Wageningen: Center for Agricultural Publication Documentation, 1966, 292 p.

SOUZA, Z. M.; JÚNIOR, J. M.; COOPER, M.; PEREIRA, G. T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p.487-492, 2006.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Viçosa, v.47, n.4, p.603-612, 2012.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R.S.; ARAÚJO, F. S. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.1, p.135-146, 2014.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.963-973, 2008.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: J. Wiley, 1948. 700p.

TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C.; LIMA, H. N. Na Amazonian Dark Earth profile description from a site located in the floodplain (várzea) in the Brazilian Amazon. In: RIOS, G. M.; CAMARGO, S. M.; CALVO, C. F. (Eds.). **Pueblos y paisajes antiguos de la selva Amazónica**. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia/Taracaxum, 2006. p.293-300.

TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso destes conhecimentos na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia ocidental, p.73-82, 2009.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p.573-581, 1998.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. C.; DEXTER, A. R. Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.65, n.1, p.56-60, 2008.

TORRES, L. C. BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V. Alterações na qualidade física de um Latossolo Amarelo sob pastagem. **Acta Amazônica**, Manaus, v.44, n.4, p.419-426, 2014.

TREVISAN, R. G.; FREDDI, O. S.; WRUCK, F. J.; TAVANTI, R. R.; PERES, F. S. C. Variabilidade de atributos físicos do solo e do arroz cultivado sob plantas de cobertura em sistema de integração lavoura-pecuária. **Bragantia**, Campinas, v.76, n.1, p.145-154, 2017.

Van GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v.1, p.1-53.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.1, p.213-223, 2011.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. **Geoderma**, Amsterdam, v.114, n.3-4, p.401-414, 2003.

ZONTA, J. H.; BRANDÃO, Z. N.; MEDEIROS, J. C.; SANA, R. S.; SOFIATTIS, V. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.6, p.595-602, 2014.

## **CAPÍTULO II: USO DE PASTAGEM EM TERRAS PRETAS ARQUEOLÓGICAS REDUZ A QUALIDADE FÍSICA DO SOLO**

### **RESUMO**

O avanço dos sistemas agropecuários em solos antropogênicos, tem gerado preocupações constantes no que diz respeito a sua degradação, pois o uso inadequado desses solos, propicia a diminuição da sua qualidade física. Assim, o objetivo desse estudo foi avaliar a qualidade física do solo em áreas de produção de feijão guandu e pastagem, em Terras Pretas Arqueológicas TPAs, por meio do Intervalo Hídrico Ótimo e, comparar os resultados obtidos com um sistema de floresta natural. A pesquisa foi desenvolvida no município de Novo Aripuanã, no sul do Amazonas, em um Latossolo Amarelo eutrófico argissólico, onde foram coletadas amostras indeformadas nas camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, para determinação dos atributos físicos do solo, tais como: densidade do solo, resistência do solo à penetração, macroporosidade, retenção de água no solo e intervalo hídrico ótimo (IHO). A geoestatística foi utilizada para verificar a distribuição espacial do conteúdo de água em cada área estudada. A conversão de florestas natural em pastagens, em áreas de Terras Pretas Arqueológicas, provoca aumento da densidade do solo e resistência do solo à penetração e, simultaneamente reduz a macroporodidade, conferindo conseqüentemente a essas áreas, menor conteúdo de água nos limites críticos do intervalo hídrico ótimo e, menor qualidade física do solo.

**Palavras-chaves:** Alterações dos atributos físicos, solos antropogênicos, uso do solo, estrutura do solo.

## CHAPTER II: USE OF PASTURE IN ARCHAEOLOGICAL BLACK LANDS REDUCES PHYSICAL QUALITY OF SOIL

### ABSTRACT

The advancement of farming systems in anthropogenic soils has generated constant concerns regarding their degradation, since the inadequate use of these soils leads to a decrease in their physical quality. Thus, the objective of this study was to evaluate soil physical quality in areas of pigeon pea and pasture production in TPAs, through the Optimum Water Interval, and to compare the results obtained with a natural forest system. The research was carried out in the city of Novo Aripuanã, in the south of Amazonas, in an Oxisol eutrophic Yellow Latosol, where undisturbed samples were collected in the layers of 0.00-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.40 m, to determine soil physical attributes, such as: soil density, soil penetration resistance, macroporosity, soil water retention and optimum water interval (IHO). Geostatistics was used to verify the spatial distribution of the water content in each studied area. The conversion of natural forests to pastures in areas of Black Archaeological Land causes increased soil density and soil resistance to penetration and simultaneous reduction of macroporosity, consequently conferring to these areas a lower water content within the critical limits of the water range optimum, and lower soil physical quality.

**Key-word:** Changes in physical attributes, anthropogenic soils, soil management, soil structure.

## 2.1 INTRODUÇÃO

As Terras Pretas Arqueológicas (TPAs), também conhecidas como terra preta de índio, são recursos agrícolas únicos, que se distinguem dos solos altamente intemperizados predominantes na Amazônia, por apresentarem elevado teor de nutrientes, matéria orgânica e carbono em uma forma muito estável (carbono pirogênico), em decorrência disso, são solos altamente valorizados por agricultores e pesquisadores da região (SÖDERSTRÖM *et al.*, 2016).

Atualmente, é amplamente aceito que as TPAs tenham se formado de alguma maneira por atividade humana, no entanto, ainda existem duas teorias para sua formação, a primeira delas é a antrópica, onde acredita-se que as TPAs tenham se formado de maneira não intencional e, a outra, a antropogênica, em que se considera que esses solos tenham sido intencionalmente formados. Se esta última for comprovada e for possível reproduzir (talvez melhorar) e disseminar as técnicas em todo o mundo, isso poderia ser um enorme benefício para a agricultura moderna (BARROW, 2012).

De acordo com Barrow (2012), acredita-se que o fator chave de diferenciação das TPAs seja os elevados teores de carbono pirogênico, porém, o uso inadequado do solo tende a influenciar a manutenção dessas reservas (MARQUES *et al.*, 2015). Moline e Coutinho (2015), apontam que a abertura de novas áreas na Amazônia para a agricultura implica redução expressiva do teor de matéria orgânica depositada nas camadas superficiais causando diminuição da disponibilidade de nutrientes, o que, associado ao manejo inadequado do solo, diminui a produtividade das culturas ao longo do tempo.

A pecuária bovina está fortemente associada com o desmatamento da Amazônia, (RIVERO *et al.*, 2009). Contudo, o uso de TPAs para a produção de pastagem, resulta em degradação física do solo devido a compactação induzida pelo pisoteio dos animais, principalmente nas camadas superficiais (PIRES *et al.*, 2012). De acordo com Soares *et al.* (2015) os efeitos negativos dos sistemas de pastagens sobre terras pretas arqueológicas envolvem acentuados valores de resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo (Ds) e microporosidade (Micro), na camada de 0,00-0,05 m, indicando um solo compactado em superfície.

Uma das alternativas de baixo impacto sob o processo de degradação na região Amazônica é o cultivo do feijão guandu (*Cajanus cajan*), utilizado principalmente para subsistência familiar. Em estudos com uso de adubação verde na recuperação de solos degradados por mineração na floresta Amazônica, Longo *et al.* (2011), verificaram que o feijão guandu e outras espécies proporcionaram melhor recobrimento do solo. Segundo Brazaca *et al.* (1996), dentre as espécies de plantas descompactadoras o feijão guandu (*Cajanus cajan*), se

destaca por apresentar sistema radicular profundo, capaz de se desenvolver em solos com tendência em formar crosta na superfície.

Em adição, a qualidade física do solo influencia os seus processos químicos e biológicos e, por consequência, desempenha papel central em estudos sobre qualidade do solo (STRECK *et al.*, 2008). Complementarmente, Reichert *et al.* (2003) apontam que a qualidade física do solo está associada à boa infiltração, retenção e disponibilidade de água para as plantas.

Diversos atributos físicos podem ser utilizados para caracterizar a qualidade física do solo, no entanto, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) proposto por Silva *et al.* (1994) a partir dos pressupostos de Letey (1985) tem sido amplamente utilizado como índice na avaliação da qualidade física do solo, visto que integra as variações do conteúdo de água em função da densidade do solo em que ocorrem mínimas limitações ao desenvolvimento de plantas, considerando à porosidade aeração, resistência do solo à penetração e água disponível.

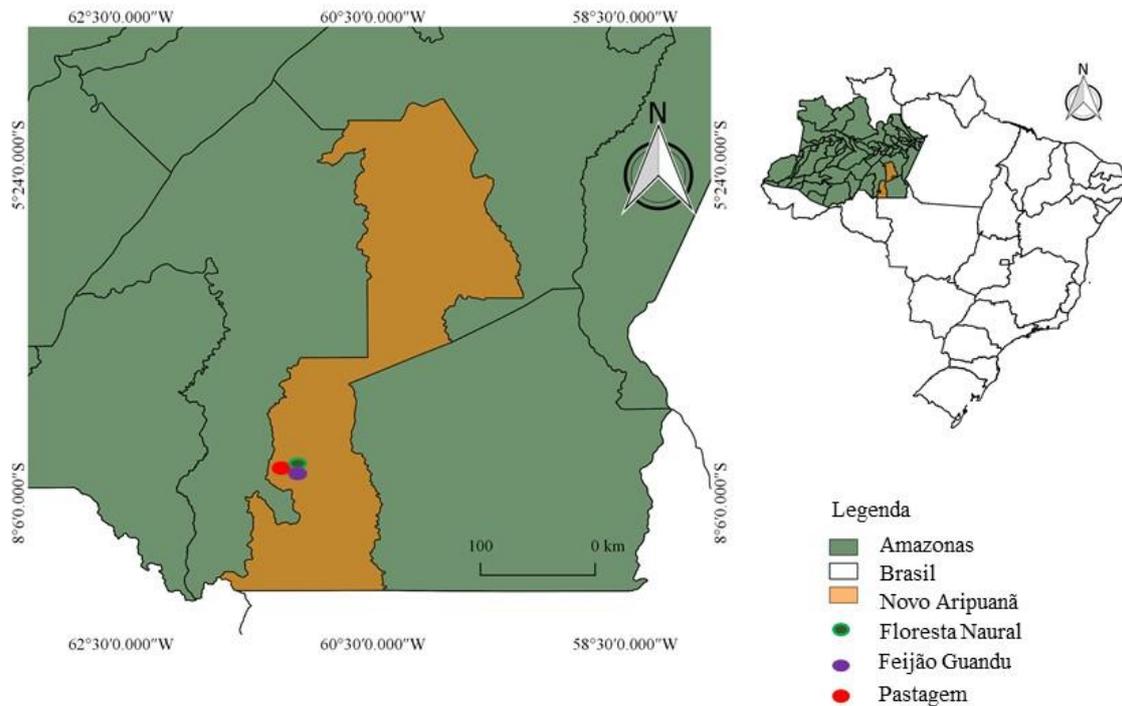
Muitos sítios arqueológicos com TPAs, estão localizados no denominado “Arco do desmatamento”, que caracteriza-se pelo avanço dos sistemas agropecuários na região Amazônia e, pesquisas que propuseram a investigar a qualidade física dos solos antropogênicos são poucos ou incipientes nessas regiões. Nesse contexto, permanece a seguinte questão: Qual o impacto da produção pastagem e feijão guandu na qualidade física do solo de TPAs?

Dessa maneira, o objetivo desse estudo foi avaliar a qualidade física do solo em áreas de produção de feijão guandu e pastagem, em Terras Pretas Arqueológicas, por meio do Intervalo Hídrico Ótimo e, comparar os resultados obtidos com um sistema natural de mata nativa. Para isso, foi testado a hipótese de que a exploração de Terras Pretas Arqueológicas por feijão guandu determina um maior Intervalo Hídrico Ótimo quando comparado com a ocupação por pastagem (*Brachiaria brizanta*), tendo como referência a floresta natural.

## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada no município de Novo Aripuanã, no sul do Amazonas, Brasil, situado ao longo da rodovia Transamazônica, BR-230, com coordenadas geográficas de 07°51'30" de latitude sul e 61°18'01" de longitude oeste (Figura 8). O clima da região é o tropical chuvoso, apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade média parcial varia entre 2.250 e 2.750 mm ao ano, com período chuvoso entre outubro e junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25 e 27 °C e a umidade relativa do ar entre 85 e 90% (BRASIL, 1978).

Figura 8 - Localização das áreas de estudos no município de Novo Aripuanã, no sul do Amazonas, Brasil.



A região apresenta relevo marcado pela presença de platôs nas partes mais elevadas e por planície nas partes mais baixas, que tem como principais características a presença de uma superfície pediplanada, localmente interrompida por colinas de topo plano (CPRM, 2001). O solo foi classificado como Latossolo Amarelo eutrófico argissólico, segundo SBCS (EMBRAPA, 2013).

Foram selecionadas três áreas de estudos sobre Terra Preta Arqueológica, submetidas aos seguintes usos: i) mata natural (Floresta Amazônica) sendo preservada a mais de vinte e cinco anos com árvores secundárias de grande porte, entre quinze e vinte metros de altura; ii) pastagem brachiaria (*Brachiaria brizanta*) com gado de corte da raça nelore, pastejo extensivo, sem presença de divisão de pastos, sem adição de adubos e corretivos no solo; iii) feijão guandu (*Cajanus cajan*), estando coberta com várias plantas trepadeiras nativas, ressaltando que nos últimos 25 anos, as duas últimas áreas, foram cultivadas com milho, feijão e melancia.

A amostragem foi realizada aleatoriamente, de maneira que pudesse representar cada área de estudo, com auxílio de anéis volumétricos de 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro

para amostras indeformadas. Foram coletadas 20 amostras por camada (0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m), com 60 amostras por área, totalizando 180 amostras, as quais foram utilizadas para obtenção das curvas de retenção de água, resistência do solo à penetração, densidade do solo, macroporosidade e Intervalo Hídrico Ótimo.

A macroporosidade foi calculada pela diferença entre porosidade total (Equação 9) e a microporosidade (água retida na tensão de -0,006 MPa), segundo método descrito pela Embrapa (2017).

$$PT = \left( 1 - \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (9)$$

em que, PT = porosidade total; D<sub>s</sub> = densidade do solo; D<sub>p</sub> = densidade de partícula.

Após a coleta, no laboratório as amostras foram preparadas e saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água pura em uma bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura dos anéis. Para determinar o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), utilizou-se o método descrito por Silva *et al.* (1994) e Tormena *et al.* (1998). Em seguida, foram submetidas a diferentes tensões ( $\Psi$ ) 2, 4, 6, 10, 33, 50 e 500 kPa, em câmaras de Richards com placas porosas (SILVA *et al.*, 1994). Os valores de  $\theta_{RP}$ ,  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  foram linearizados, utilizando-se a transformação logarítmica.

O limite superior do IHO foram  $\theta_{CC}$  e/ou  $\theta_{PA}$ , enquanto o limite inferior foram  $\theta_{PMP}$  e/ou  $\theta_{RP}$ . A densidade do solo crítica ao crescimento e desenvolvimento das plantas (D<sub>sc</sub>) foi considerada como o valor de D<sub>s</sub> em que o IHO foi igual a zero. Na realização do cálculo do IHO, conforme Wu *et al.* (2003), podem ser quatro as possibilidades e que dependem dos valores de quatro parâmetros: quantidade de água na porosidade de aeração, na capacidade de campo, na resistência do solo à penetração e no ponto de murcha permanente. As possibilidades são: se ( $\theta_{PA} \geq \theta_{CC}$ ) e ( $\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}$ ), então o IHO =  $\theta_{CC} - \theta_{PMP}$ ; se ( $\theta_{PA} \geq \theta_{CC}$ ) e ( $\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}$ ), o IHO =  $\theta_{CC} - \theta_{RP}$ ; se ( $\theta_{PA} \leq \theta_{CC}$ ) e ( $\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}$ ), o IHO =  $\theta_{PA} - \theta_{PMP}$ ; e se ( $\theta_{PA} \leq \theta_{CC}$ ) e ( $\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}$ ) o IHO =  $\theta_{PA} - \theta_{RP}$ .

Após atingirem o equilíbrio em cada tensão, as amostras foram pesadas e foi determinada a resistência do solo à penetração, em laboratório, em três pontos para cada amostra, utilizando-se um penetrômetro eletrônico marca Marconi, modelo MA-933, com velocidade de deslocamento constante de 1,0 cm min<sup>-1</sup>, equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4,0 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30°, receptor e interface acoplado a um computador, para registro das leituras por meio de um *software* próprio do equipamento.

Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105 °C até massa constante. O teor de água no solo em base volumétrica foi quantificado pelo quociente do volume de água retida na amostra em cada tensão e o volume do solo de cada amostra. A densidade do solo foi obtida pela relação massa de solo seco e volume do cilindro (EMBRAPA, 2017).

A curva de retenção de água no solo, que relaciona o potencial matricial e a umidade volumétrica do solo, foi ajustada ao modelo utilizado por Tormena *et al.* (1998) e Leão *et al.* (2006), equações 10 e 11, utilizando-se o *software* SAS®:

$$\theta = \exp(d + eD_s) * y^f \quad (10)$$

Ou alternativamente:

$$\ln(\theta) = \ln(a) + b * D_s + c \ln(y) \quad (11)$$

em que,  $\theta$  = conteúdo volumétrico de água ( $m^3 m^{-3}$ ),  $y$  = potencial matricial (MPa);  $d_s$  = densidade do solo ( $Mg m^{-3}$ ); “d” “e” “f” = coeficientes de ajuste do modelo. Assim, foi determinada a variação da umidade na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) na tensão de 0,01 MPa (HAISE *et al.*, 1955) e, no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ) na tensão de 1,5 MPa (SAVAGE *et al.*, 1996) em função da  $d_s$ .

A porosidade de aeração (PA) mínima foi de 0,10  $m^3 m^{-3}$ , considerada o valor mínimo responsável por uma taxa de difusão adequada de oxigênio da atmosfera até as raízes (DEXTER, 1988). O teor de água no solo considerando a PA ( $\theta_{PA}$ ) foi calculado pela equação 12:

$$\theta_{PA} = \left[ 1 - \frac{D_S}{D_P} \right] - 0,1 \quad (12)$$

em que,  $\theta_{PA}$  = conteúdo volumétrico de água ( $m^3 m^{-3}$ ), considerando uma porosidade de aeração de 0,10  $m^3 m^{-3}$ ;  $D_P$  e  $D_S$  = densidade de partículas ( $Mg m^{-3}$ ) e do solo ( $Mg m^{-3}$ ), respectivamente. A densidade de partícula foi medida pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 2017).

Os gráficos de Boxplot e a análise de variância (ANOVA) foram realizados por meio do software SigmaPlot versão 11.0. Quando os resultados foram significativos, aplicou-se o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) para comparação entre as médias. A determinação da distribuição espacial do conteúdo de água disponível foi por meio do software Sufer versão 10.0 obtida pelo cruzamento dos dados de densidade das áreas com os modelos de estimativa do IHO para cada área, conforme descrito por Araújo *et al.* (2013).

As malhas amostrais para floresta natural e pastagem foram de 88 pontos e 90 pontos amostrais para o feijão guandu, com espaçamentos entre os pontos de 6 x 6, 4 x 5 e 8 x 8 m, respectivamente. Todos pontos foram georreferenciados com um equipamento de GPS Garmin Etrex (South American '69).

### 2.3 RESULTADOS

As variações dos atributos físicos, densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RP) e macroporosidade (Macro) em função dos diferentes usos do solo são apresentados na Figura 9. Em todas as camadas amostradas verificou diferenças entre usos do solo, observa-se que a área de pastagem nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m apresentou maiores valores de Ds. Por outro lado, na camada de 0,20-0,40 m, os valores de Ds foram semelhantes para floresta natural, feijão guandu e pastagem. Destaca-se que os menores valores de Ds foram observados para floresta natural em todas as camadas estudadas.

No que se refere à RP, os valores variaram entre 0,5 a 2,5 MPa e, em ordem decrescente para todas as camadas, os maiores valores de RP foram observados para pastagem, seguida do feijão guandu e floresta natural (Figura 9). Sendo que a RP apresentou elevada variabilidade entre os dados de pastagem, principalmente na camada de 0,10-0,20 m. Em contrapartida, a RP na floresta natural foi baixa em todas as camadas estudadas.

Observa-se que a macroporosidade foi consideravelmente maior na floresta natural quando comparado com a pastagem nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (Figura 9). Esse resultado é inversamente proporcional aos resultados obtidos para os atributos físicos (Ds e RP), onde os maiores valores foram observados na pastagem e os menores na floresta natural. Na camada de 0,10-0,20 m, a floresta natural e o feijão guandu apresentaram comportamento similar e, na pastagem verificou predominância de baixos valores de macroporosidade em todas as camadas.

Na Figura 10, estão apresentadas as curvas de retenção de água no solo para os diferentes sistemas de uso do solo, ajustados segundo o modelo matemático proposto por Van Genuchten (1980). Observa-se para camada de 0,00-0,10 m, as áreas de pastagem e feijão guandu apresentaram comportamento semelhante entre si e superior à área de floresta natural, para as baixas tensões (0 a 10 kPa), entretanto, em tensões mais elevadas (100 a 1.500 kPa), verifica-se uma inversão no comportamento da retenção de água, onde a área de floresta natural apresentou maior retenção de água que o feijão guandu e a pastagem.

Figura 9 - Box-plot dos atributos físicos do solo utilizados no ajuste do IHO das terras pretas arqueológicas sob diferentes manejos, nas camadas de 0,0-0,10 (A), 0,10-0,20 (B) e 0,20-0,40 m (C).

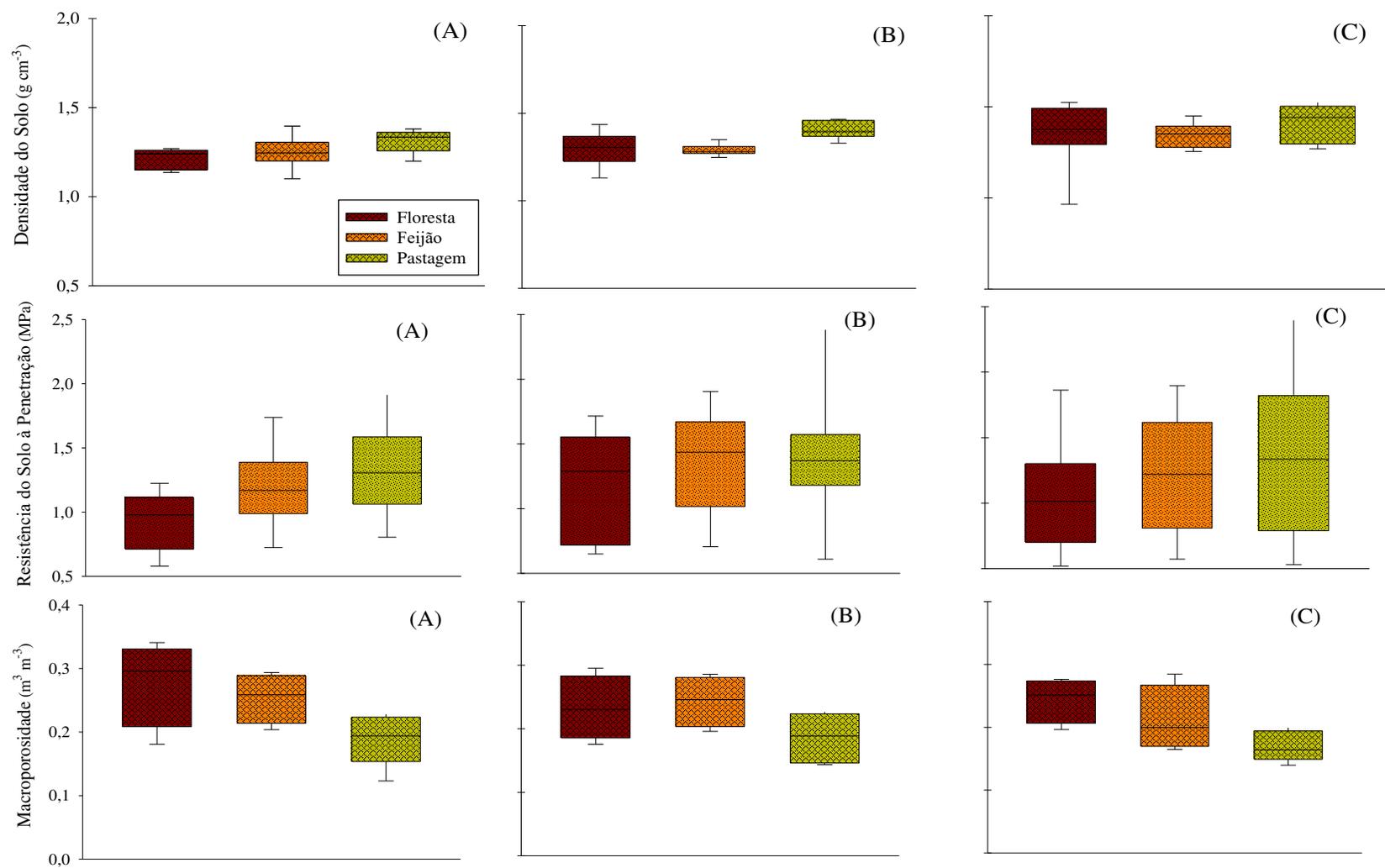
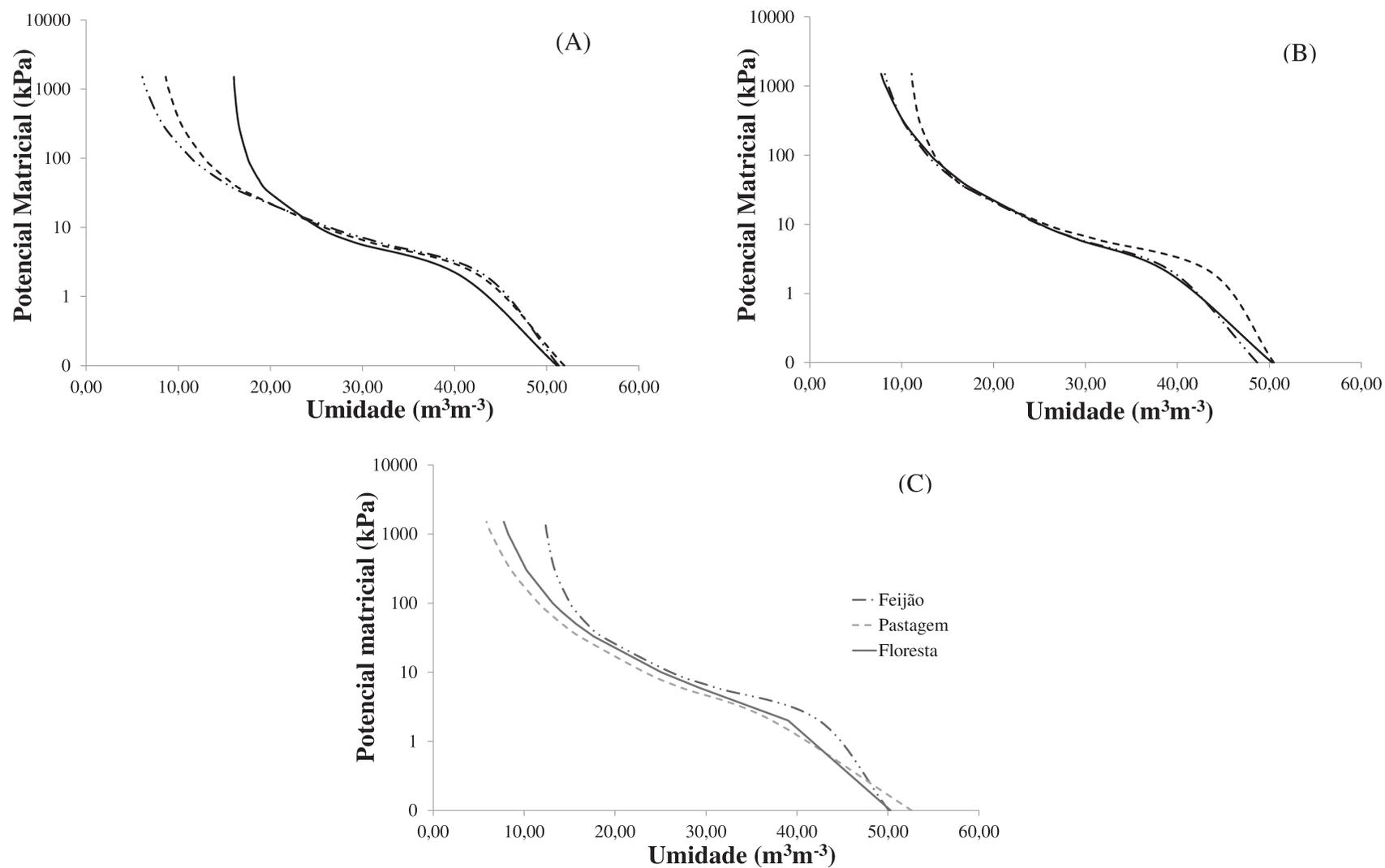


Figura 10 - Retenção de água no solo em função do potencial matricial ( $\Psi_m$ ) em terras pretas arqueológicas sob diferentes usos nas camadas 0,0-0,10 (A), 0,10-0,20 (B) e 0,20-0,40 m (C), segundo o modelo de Van Genuchten.



Além disso, visualiza-se uma diferenciação das curvas de retenção de água no solo em camada (Figura 10). De modo geral, para cada camada um uso do solo obteve maior retenção de água, com a seguinte ordem: floresta natural, pastagem e feijão guandu, nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente.

Os parâmetros das curvas de retenção de água no solo ajustados ao modelo de Van Genuchten, encontram-se na Tabela 2. Observou-se que, no ajuste das curvas de retenção de água, pelo modelo de Van Genuchten, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) variou entre 88 e 97% para todos os manejos estudados, afirmando que o modelo representa a interação entre o conteúdo de água no solo dentro do intervalo de potencial matricial avaliado.

Tabela 2 - Coeficientes de ajuste da curva de retenção de água do solo em terra preta arqueológica sob diferentes manejos, nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m.

Manejos	$\theta_{sat}$ ( $g\ g^{-1}$ )	$\theta_{res}$ ( $g\ g^{-1}$ )	$\alpha$	$n$	$m$	$R^2$
0,00-0,10 m						
Floresta	0,52	0,02	1,11	1,36	0,26	0,95
Feijão	0,51	0,04	0,41	1,50	0,33	0,95
Pastagem	0,51	0,07	0,47	1,54	0,35	0,95
0,10-0,20 m						
Floresta	0,51	0,15	0,57	1,74	0,42	0,96
Feijão	0,48	0,06	0,54	1,47	0,32	0,96
Pastagem	0,50	0,10	0,35	1,73	0,42	0,97
0,20-0,40 m						
Floresta	0,50	0,05	0,74	1,39	0,28	0,96
Feijão	0,50	0,11	0,42	1,65	0,39	0,88
Pastagem	0,51	0,08	0,41	1,64	0,39	0,95

$\theta_{sat}$  = umidade de saturação;  $\theta_{res}$  = umidade residual;  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  = parâmetros do modelo.

O IHO obtido para TPAs e o IHO obtido para os respectivos sistemas de uso do solo em camada, encontram-se na Figura 11. A variação do conteúdo de água nos limites críticos do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) pode ser vista na área hachurada, cuja variação de 0,14 a 0,28  $m^3\ m^{-3}$  (Figura 11A). Observa-se que até a densidade de 1,32  $Mg\ m^{-3}$  o conteúdo de água no IHO foi igual a água disponível, sendo o limite superior a capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e o limite inferior o ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ). A porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ )  $\leq$

$0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  não foi restritiva como limite superior, enquanto no limite inferior a RP, substituiu o ( $\theta_{PMP}$ ) como limite inferior a partir da  $D_s$  de  $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$ .

O máximo valor de densidade do solo encontrado, foi de  $1,71 \text{ Mg m}^{-3}$ , sendo esse inferior ao valor de  $2,09 \text{ Mg m}^{-3}$  apontado como densidade crítica, na qual indica o valor de IHO igual a zero (Figura 11). Na determinação do IHO a RP variou positivamente com a  $D_s$  e negativamente com o conteúdo de água.

Os mapas de variação espacial do IHO em diferentes sistemas de uso do solo estão apresentados na Figura 12. Verificou-se variação do conteúdo de água entre os diferentes usos, com maior conteúdo de água para o feijão guandu na faixa de  $0,12$  a  $18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , e o menor para a pastagem variando de  $0,07$  a  $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . A floresta natural a por sua vez, variou de  $0,11$  a  $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Observa-se que a área de feijão guandu, apresentou distribuição de água mais homogênea em toda sua área, exceto alguns pequenos pontos, em contraste, a pastagem que apresentou predominância de um menor conteúdo de água em toda a sua extensão.

Figura 11 - Intervalo hídrico ótimo em áreas de TPAs, na camada de  $0,00$ - $0,40 \text{ m}$  (A), representando a variação no conteúdo de água do solo na capacidade de campo (CC,  $\psi = 0,010 \text{ MPa}$ ), ponto de murcha permanente (PMP,  $\psi = 1,500 \text{ MPa}$ ), porosidade de aeração (PA =  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e resistência do solo à penetração (RP =  $2,0 \text{ MPa}$ ). Densidade do solo crítica =  $2,09 \text{ Mg m}^{-3}$ . Teste de Tukey a 5% (B).

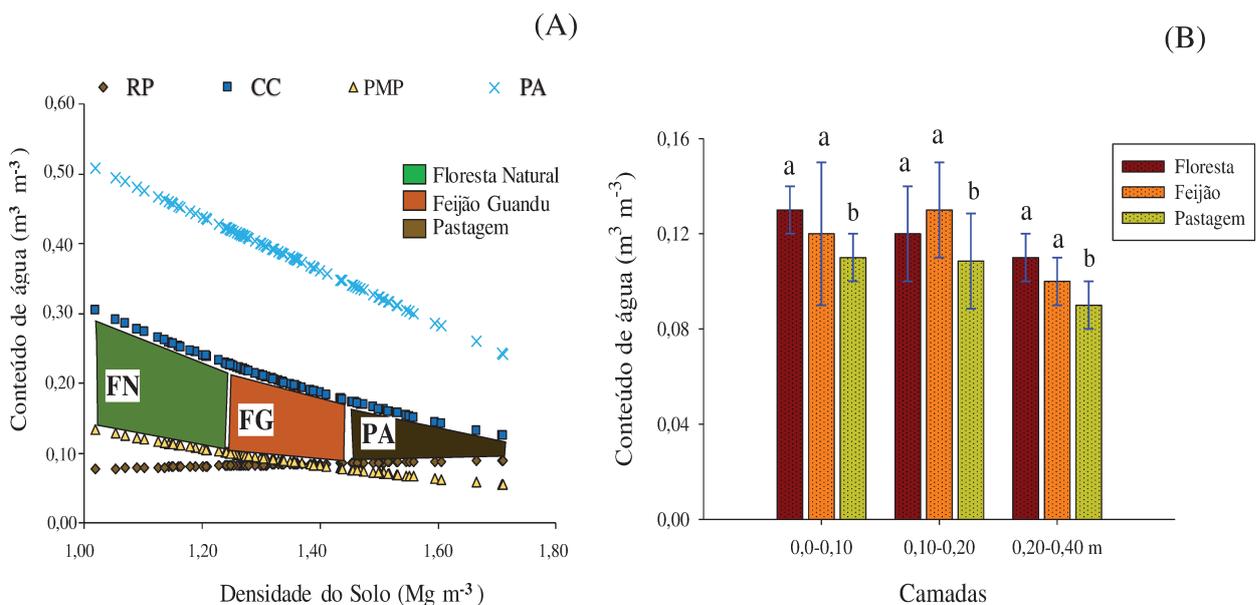
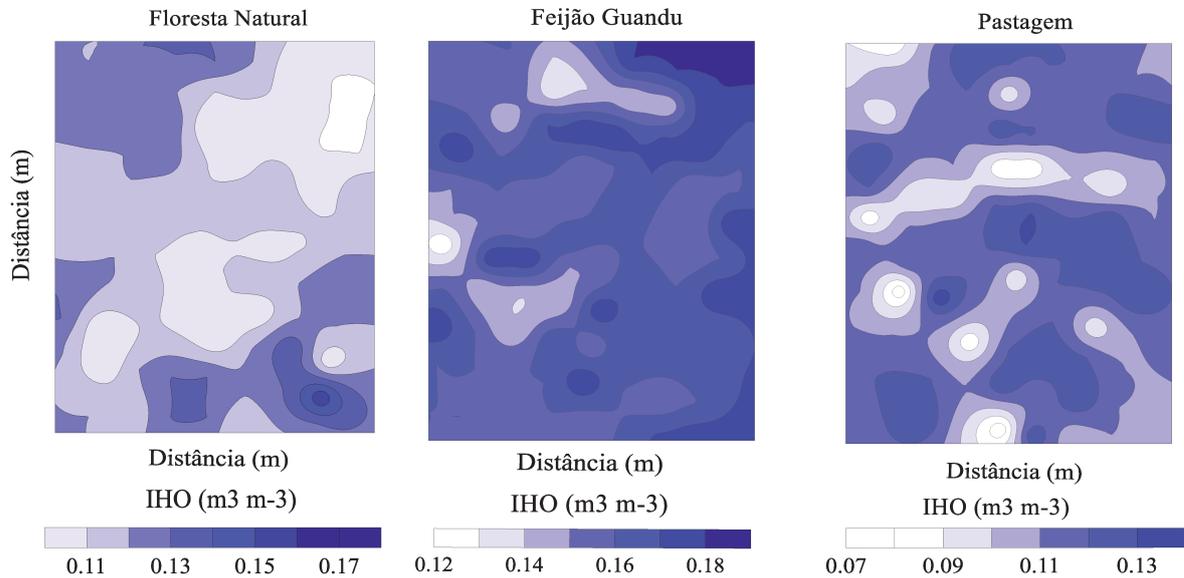


Figura 12 - Variação espacial do intervalo hídrico ótimo das terras pretas arqueológicas sob diferentes manejos na camada de 0,00-0,10 m.



### 2.3 DISCUSSÃO

Os valores de  $D_s$  verificados nesse estudo foram menores na floresta natural e maiores na pastagem em todas as camadas, exceto na camada de 0,20-0,40 m, onde os manejos foram mais próximos, por sua vez, o feijão guandu apresentou valores intermediários entre a floresta e a pastagem. Provavelmente, as baixas  $D_s$  em floresta natural ocorrem devido à ausência de perturbação do ambiente. Os resultados da  $D_s$  para TPA sob floresta, foram semelhantes aos relatados por Oliveira *et al.* (2015). Em contrapartida, para pastagem, tais resultados podem ser atribuídos a influência do pisoteio animal, com consequências de compactação do solo, diminuição da taxa de infiltração e aumento da erosão.

Ao analisar a variação dos dados de  $D_s$  em profundidade e, para cada sistema de uso, foi observado que na camada de 0,00-0,10 m, a maior variação foi para o feijão guandu e menor para floresta natural, de modo que na camada 0,10-0,20 m, ocorreu o inverso, com maior variação na floresta natural e menor para o feijão guandu. Na última camada 0,20-0,40 m, houve uma menor variação no feijão guandu, maior para a floresta com uma leve assimetria tendendo a menores valores, porém, a pastagem apresentou assimetria tendendo a valores maiores.

A densidade do solo aumentou em camada para os três sistemas de uso do solo em estudo, acredita-se que os valores baixos de  $D_s$  podem ser associados ao alto teor de matéria orgânica encontrados nos solos antropogênicos, principalmente na camada superficial. Santos *et al.* (2013) em terras pretas arqueológicas encontrou teor de matéria orgânica de  $87,29 \text{ g kg}^{-1}$ .

Campos *et al.* (2012), também observaram que horizontes antropogênicos apresentaram valores mais baixos de Ds em todos os perfis estudados e, estes valores tendem a aumentar com a profundidade.

A RP aumentou em camada, demonstrando o mesmo comportamento obtido na Ds, esta interação entre esses dois atributos, também pode ser observado no IHO, visto que o aumento da Ds, caracterizou a RP como limite inferior. Ao analisar o comportamento da RP em função dos diferentes sistemas de uso, a floresta natural apresentou os menores valores de RP e, os maiores para a pastagem. O aumento de RP em TPAs cultivadas com cacau, também foi verificado por Silva *et al.* (2016), onde os valores variaram de 0,89 a 1,13 MPa, nas camadas de 0,00-0,05 e 0,20-0,30 m, respectivamente. Soares *et al.* (2015) em pesquisa dos atributos físicos do solo em TPAs sob pastagem, encontraram valores de RP iguais a 2,10 MPa para camada superficial. Considerando o valor limitante de RP ao desenvolvimento das plantas entre 2,0 a 2,5 MPa (BETIOLI JÚNIOR *et al.*, 2012), somente a pastagem na camada de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m apresentou valores próximos a estes.

A macroporosidade apresentou um comportamento oposto ao dos atributos Ds e RP, com elevados valores na floresta natural e baixos na pastagem, evidenciando que na floresta há predominâncias de poros maiores, podendo ser associados aos baixos valores de Ds e RP. Esses resultados corroboram com os encontrados por Matias *et al.* (2009) que, ao investigar os atributos físicos em mata nativa, pastagem e área cultivada, observaram a relação inversa entre Ds e Macro. Brito *et al.* (2018), ao investigar os atributos físicos do solo em diferentes usos, constataram que a pastagem apresentou os maiores valores de RP.

Observa-se, que ocorreu decréscimo da macroporosidade para todos os sistemas de usos do solo em camada, com valores elevados na camada superficial e inferiores na última camada. É válido ressaltar que, a floresta está em sua condição natural, sem nenhuma ação antrópica, para o feijão guandu, possivelmente o revolvimento do solo, promoveu uma maior porosidade. Os menores valores de macro correspondentes à pastagem apontam que suas partículas sólidas tendem a estar em íntimo contato, fato este confirmado com os valores de Ds. Contudo, todos os sistemas de uso do solo e camadas, permaneceram com valores acima de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , considerado como referência para as condições ideais de aeração do solo para o desenvolvimento dos vegetais, de acordo com Pigliai *et al.* (2003). Dessa maneira, os valores de macro estão de acordo com os resultados obtidos no IHO, visto que a porosidade de aeração não foi limitante ao longo do intervalo de água equivalente ao IHO.

Quanto as curvas de retenção de água, em geral, observam-se diferença em retenção de água entre os sistemas de uso e camadas avaliadas. Na camada de 0,00-0,10 m, as áreas de

pastagem e feijão guandu obtiveram comportamento semelhante quanto à retenção de água e superior à área de floresta natural, para as baixas tensões (0 a 10 kPa). Isso devem estar relacionados à redução da macroporosidade e aumento da microporosidade do solo, em que favorece a retenção de água. Conforme observações realizadas por Ramos *et al.* (2013) para retenção de água em diferentes manejos, a pastagem apresentou resultados semelhante a este estudo. Rawls *et al.* (1991) destaca que, em baixas tensões, a curva de retenção é influenciada por poros estruturais associados ao efeito da matéria orgânica na formação e na estabilidade da estrutura do solo.

No entanto, em tensões mais elevadas (100 a 1500 kPa), verifica-se que a área de floresta natural apresentou maior retenção de água na camada de 0,00-0,10 m. Klein e Libardi (2002) apontam que diferenças nas zonas de baixa tensão interferem muito pouco na disponibilidade de água às plantas, pois estão relacionados a água facilmente drenável. Em contrapartida, as diferenças mais importantes ocorrem próximos ao ponto de murcha permanente, pois maiores valores significam mais água indisponível.

Comparando os sistemas de uso, verifica-se uma diferenciação das curvas de retenção de água no solo. De acordo com Bertol *et al.* (2001) a intensificação do cultivo promove o surgimento de camadas compactadas, com redução do volume de macroporos e aumento de microporos, ocasionando conseqüentemente uma diminuição do volume de poros ocupado pelo ar e um aumento na retenção de água. No entanto, Sales *et al.* (2010) destacam que em condições naturais em que a porosidade de aeração é elevada, o aumento na microporosidade decorrente da redução de parte dos macroporos pode ser benéfico por aumentar a retenção de água disponível.

A variação do conteúdo de água nos limites críticos do IHO observados nesse estudo (0,03 a 0,21 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) foi superior a resultados comumente relatados na literatura em solos agrícolas de origem mineral. Ao analisar o IHO em áreas de pastagem recém convertidas a partir de cerrado nativo, Leão *et al.* (2006) verificaram amplitude de 0,014 a 0,132 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para áreas de pastejo contínuo e, 0,00 a 0,08 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> para áreas de pastejo de curta duração em Latossolo Vermelho distrófico com 40% de argila. Em complemento, Tomena *et al.* (1998) observaram amplitude de variação do IHO de 0,0073 até 0,125 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> em Latossolo Roxo cultivado em milho no sistema de plantio direto. Esse resultado permite inferir que as TPAs apresentam uma menor predisposição em oferecer condições físicas restritivas ao desenvolvimento das plantas, devido a menor probabilidade dos teores de água no solo ficarem fora dos limites do IHO.

Os resultados também apontam que o valor de densidade crítica não foi atingido, sugerindo conseqüentemente que os diferentes sistemas de manejo avaliados nesse trabalho não proporcionaram condições restritivas drásticas ao crescimento de plantas, pois os valores de densidade do solo estiveram abaixo da densidade crítica.

De acordo com Torres *et al.* (2014) a ocorrência de  $D_s > D_{sc}$  sinaliza para a degradação física do solo. Tormena *et al.* (2007) avaliaram o IHO de um Latossolo Vermelho e, observaram que a intensificação do uso do solo proporcionou perdas da qualidade física e estrutural, em que foi evidenciada pela redução da amplitude do IHO, em ordem decrescente: mata, pastagem, citros e cultivo.

Em relação a  $D_{sc}$ , destaca-se ainda, que o valor encontrado de  $2,09 \text{ Mg m}^{-3}$ , é elevado em relação aos resultados encontrados na literatura para solos minerais cultivados. Por exemplo. Moreira *et al.* (2014) obtiveram densidade crítica de  $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$  em Latossolo Vermelho na camada de 0,00-0,10 m. Guimarães *et al.* (2013) ao examinarem a degradação física do solo em diferentes manejos, verificaram densidade crítica de  $1,75$  e  $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ , para solo sob citros e pastagem, respectivamente.

Observa-se que até a densidade de  $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$  o conteúdo de água no IHO foi igual a água disponível, sendo o limite superior a capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e o limite inferior o ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ). No entanto, a partir desse ponto, há indícios de se iniciar o processo de degradação estrutural, uma vez, que o limite inferior passa a ser a resistência do solo à penetração ( $\theta_{RP}$ ). Verificou-se um decréscimo da porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) em função do aumento da densidade do solo, porém, se manteve acima da ( $\theta_{CC}$ ). Desse modo, a aeração não foi limitante ao adequado crescimento das plantas, visto que a macroporosidade foi superior a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

Em estudo avaliando o IHO em um Latossolo Vermelho sob dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar, Araújo *et al.* (2013), observaram que independentemente dos sistemas, a resistência do solo à penetração determinou o limite inferior do IHO e reduziu os seus valores com o aumento da densidade do solo, caracterizando perda da qualidade física do solo.

Para o IHO obtido nos diferentes sistemas de uso do solo, a floresta natural e o feijão guandu apresentaram o maior conteúdo de água que a pastagem e, a camada superficial, apresentou maior conteúdo de água do que quando comparado a camada de 0,20-0,40 m.

Os mapas de distribuição espacial, possibilitaram verificar maior conteúdo de água nos limites críticos do IHO para o feijão guandu, seguido da floresta e pastagem. Em cada uso, os menores conteúdos de água foram em pontos distintos. Na floresta natural, os menores

valores de conteúdo de água concentraram-se na porção central e, os maiores na porção superior a esquerda e inferior a direita. No entanto, para feijão guandu, houve predomínio de manchas com maior conteúdo de água, variando de 0,125 a 0,185 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

## 2.4 CONCLUSÕES

A conversão de florestas naturais em pastagens, em solos antropogênicos, provoca aumento da densidade do solo e resistência do solo à penetração e, simultânea redução da macroporosidade, conferindo conseqüentemente a essas áreas, menor conteúdo de água nos limites críticos do intervalo hídrico ótimo e, menor qualidade física do solo.

Logo, este estudo serve de base para afirmar a hipótese, pois o feijão guandu apresentou melhor estrutura do solo quando comparado a pastagem, tomando como referência a floresta natural.

## 2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, F. S.; SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; MATSURA, E. E.; BARBOSA, R. S. Espacialização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho em dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.6, p.651-660, 2013.

BARROW, C. J. Biochar: potential for countering land degradation and for improving agriculture. **Applied Geography**, v.34, p.21-28, 2012.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.3, p.555-560, 2001.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.36, n.3, p.971-982, 2012.

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

BRAZACA, S. G. C.; SALGADO, J. M.; MANCINI FILHO, J.; NOVAES, N. J. Avaliação física, química, bioquímica e agrônômica de cultivares de feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L) Mill). **Alimentos e Nutrição**, Araraquara, v.7, n.1, p.37-45, 1996.

BRITO, W. B. M.; CAMPOS, M.C.C.; MANTOVANELLI, B.C.; CUNHA, J. M.; FRANCISCON, U.; SOARES, M.D.R. Spatial variability of soil physical properties in archeological dark earths under different uses in southern Amazon. **Soil and Tillage Research**. Amsterdam, v.182, p.103-111, 2018.

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

CPRM. Centro de Pesquisa de Recursos Minerais. **Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens**. Manaus, 2001. 93p. (Relatório Técnico).

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.1, p.199-238, 1988.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2013. 353 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos**. 3ª edição revista e ampliada, Brasília: Embrapa, 573p. 2017.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; BLAINSKI, E.; FIDALSKI, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.6, p.1512-1521, 2013.

HAISE, H.R.; HAAS, H.J.; JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity to 1/3-atmosphere percentage and “minimum point” as related to 15-26 atmosphere percentage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.34, n.1, p.20-25, 1955.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.857-867, 2002.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.88, n.1-2, p.279-285, 2006.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, Madison, v.1, p.277-294, 1985.

LONGO, R. M.; ADMILSON, I. R.; MELO, J. W. Uso da adubação verde na recuperação de solos degradados por mineração na floresta Amazônica. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.1, p.139-146, 2011.

MATIAS, S. S. R.; BORBA, J. A.; TICELLI, M.; PANOSSO, A. R.; CAMARA, F. T. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes usos. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.40, n.3, p.331-338, 2009.

MARQUES, J. D. O.; LUIZÃO, F. J.; TEIXEIRA, W. G.; SARRAZIN, M.; FERREIRA, S. J. F.; BELDINI, T. P.; MARQUES, E. M. A. Distribution of organic carbon in different soil fractions in ecosystems of central Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, n.1, p.232-242, 2015.

MOLINE, E. F.V.; COUTINHO, E. L. M. Atributos químicos de solos da Amazônia Ocidental após sucessão da mata nativa em áreas de cultivo. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v.58, n.1, p.14-20, 2015.

MOREIRA, F. R.; DECHEN, S. C. F.; SILVA, A. P. S.; FIGUEIREDO, G. C.; MARIA, I. C.; PESSONI, P. T. Intervalo Hídrico Ótimo em um Latossolo Vermelho cultivado em sistema semeadura direta por 25 anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.1, p.118-127, 2014.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; FREITAS, L.; SOARES, M. D. R. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta Amazônica**, Manaus, v.45, n.1.p1-12, 2015.

PIRES, B. S.; DIAS JUNIOR, M. S.; ROCHA, W. W.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; CARVALHO, R. C. R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.2, p.635-642, 2012.

PAGLIAI, M.; VIGNAZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.79, n.1, p.131-143, 2004.

RAMOS, B. Z.; PAIS, P. S. M.; FREITAS, W. A.; JÚNIOR, M. S. D. Avaliação dos atributos físico-hídrico em um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes sistemas de manejo-Lavras/Minas/Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v.36, n.3, p.340-346, 2013.

RAWLS, W.J.; GISH, T.J.; BRAKENSIEK, D.L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advances in Soil Science**, Madison, v.16, p.213-234, 1991.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v.27, n.1, p.29-48, 2003.

RIVERO, S.; ALMEIDA, O.; ÁVILA, S.; WESLEY OLIVEIRA, W. Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova Economia**, v.19, n.1, p.41-66, 2009.

SALES, L.E.O.; CARNEIRO, M.A.C.; SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; FERREIRA, M.M. Qualidade física de Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.3, p.667-674, 2010.

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

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.4, p.844-851, 1996.

SILVA, D. M. P.; CAMPOS, M. C. C.; FRANCISCON, U.; ALHO, L. C.; SANTOS, L. A. C.; NETO PAULA, P.; BERGAMIM, A. C.; SOUZA, Z. M. Spatial variability of soil properties in archeological dark Earth sites under cacao cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.40, n.2, p.1-12, 2016.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M.; BRITO, W. B. M. FRANCISCON, U.; CASTIONI, G. A. F. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista Ciência Agrária/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v.58, n.4, p.434-441, 2015.

SÖDERSTRÖM, M.; ERIKSSON, J.; ISENDAHL, C.; SCHAAN, D.P.; STENBORG, P.; REBELLATO, L.; PIIKKI, K. Sensor mapping of Amazonian Dark Earths in deforested croplands. **Geoderma**, Amsterdam, v.281, n.1 p.58-68, 2016.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; RAINER, H. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas do solo do Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p.2603-2612, 2008.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p.573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.211-219, 2007.

TORRES, L. C. BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V. Alterações na qualidade física de um Latossolo Amarelo sob pastagem. **Acta Amazônica**, Manaus, v.44, n.4, p.419-426, 2014.

Van GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. **Geoderma**, Amsterdam, v.114, n.3-4, p.401-414, 2003.

### **CAPÍTULO III - O FEIJÃO GUANDU (*Cajanus cajan*) AUMENTA A FERTILIDADE DO SOLO EM TERRAS PRETAS ARQUEOLÓGICAS**

#### **RESUMO**

As terras pretas arqueológicas (TPAs) são solos antrópicos que apresentam elevada fertilidade, no entanto a concentração desses nutrientes pode variar em função da ocupação dos povos indígenas no passado ou pelo uso atual desses solos. O objetivo deste estudo foi avaliar a variação espacial dos atributos químicos do solo das terras pretas arqueológicas sob diferentes usos. Para atingir o objetivo, foram selecionadas três áreas de TPAs, sob os seguintes usos: feijão guandu, pastagem e floresta natural, sendo essa última utilizada como referência. Foram delimitadas malhas amostrais com 88 pontos para a pastagem e floresta natural e, 90 pontos para o feijão guandu. A escolha das dimensões das malhas foi definida no campo, utilizando como critério as dimensões das áreas de TPAs e suas respectivas coberturas representativa do solo. Todos os pontos foram georreferenciados com um sistema de posicionamento global (GPS). Foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m e, realizadas análises para os seguintes atributos químicos do solo: matéria orgânica do solo (MOS), potencial hidrogeniônico (pH), fósforo disponível (P), cátions trocáveis ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^{+}$ ), acidez potencial ( $\text{H}^{+}+\text{Al}^{3+}$ ), capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases (SB) e saturação de bases (V%). Todos os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, geoestatística e, em seguida, por meio do alcance foi estimado a densidade de amostragem para cada atributo químico do solo. O cultivo de feijão guandu favorece o aumento do teor de matéria orgânica do solo em relação à pastagem, principalmente na camada superficial. De modo geral, os atributos químicos, apresentaram forte a moderada dependência espacial. Com base na densidade amostral verificou uma menor variabilidade e maior continuidade espacial para o feijão guandu em relação a pastagem e floresta natural para as camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m, na última camada observou na floresta natural maior continuidade espacial e menor variabilidade.

**Palavras-chave:** Atributos químicos do solo, continuidade espacial, uso do solo, terra preta de índio, densidade amostral.

### CHAPTER III - BEAN GUANDU (*Cajanus cajan*) INCREASES SOIL FERTILITY ON ARCHAEOLOGICAL BLACK LANDS

#### ABSTRACT

Archaeological black lands (TPAs) are anthropic soils that present high fertility, however the concentration of these nutrients may vary depending on the occupation of indigenous peoples in the past or the current use of these soils. The objective of this study was to evaluate the spatial variation of soil chemical attributes of black archeological lands under different uses. To reach the objective, three TPP areas were selected, under the following uses: pigeon pea, pasture and natural forest, the latter being used as a reference. Sampling meshes with 88 points for the pasture and natural forest and 90 points for the pigeon pea were delimited. The choice of mesh dimensions was defined in the field, using as a criterion the dimensions of the TPA areas and their respective coverages representative of the soil. All points were georeferenced with a Global Positioning System (GPS). Soil samples were collected in the layers of 0.00-0.05, 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m and analyzes were performed for the following soil chemical attributes: soil organic matter (MOS), base sum (SB) and base saturation (V%), potential hydrogenation (pH), available phosphorus (P), exchangeable cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{K}^{+}$ ), potential acidity (V%). All data were submitted to descriptive statistical analysis, geostatistics and then by means of the range was estimated the sampling density for each soil chemical attribute. The cultivation of pigeon pea favors the increase of MOS content in relation to pasture, mainly in the superficial layer. In general, the chemical attributes presented strong and moderate spatial dependence. Based on the sample density, it was possible to verify a lower variability and greater spatial continuity for the pigeon pea in relation to the pasture and natural forest for the layers of 0.00-0.05 and 0.05-0.10 m, in the last layer the natural forest showed greater spatial continuity and less variability.

**Key words:** Soil chemical attributes, spatial continuity, soil use, black Indian soil, sample density

### 3.1 INTRODUÇÃO

Os solos antropogênicos da região Amazônica destacam-se por sua elevada fertilidade natural, em função do alto teor de matéria orgânica do solo (MOS) em uma forma de difícil degradação. Estes solos são conhecidos como “Terra Preta Arqueológica”, “Terra Preta Antropogênica”, ou simplesmente “Terra Preta de Índio”, com horizonte A antrópico (Au), presença de fragmentos cerâmicos e coloração escura, conforme descrito por Kämpf e Kern (2005).

De acordo com Madari *et al.* (2009) a manutenção da fertilidade do solo em terras pretas arqueológicas (TAPs) é atribuída à quantidade e a qualidade da MOS. Barros *et al.* (2012) em estudo com fertilidade de três sítios arqueológicos antropogênicos, verificaram pH em torno de 5,36 a 6,11 e fósforo disponível de 242 mg kg<sup>-1</sup>. Entretanto, existe grande variação nos teores de nutrientes presentes nos solos dos sítios arqueológicos, o que pode ser atribuído à variação natural do solo ou ao uso dessas áreas por meio das ações antrópicas. Em vista disso, Oliveira *et al.* (2015a), em estudo com variabilidade espacial entre diferentes usos, verificou alta variabilidade espacial para alguns atributos químicos para solos antropogênicos no sul do Amazonas.

Com a expansão das atividades agrícolas sobre as áreas de TPAs, esses ambientes vêm se modificando no decorrer dos anos, especialmente na região Sul do Amazonas, onde há um avanço dos sistemas agropecuários. Logo, pesquisas voltadas a identificar alterações nos atributos químicos do solo em função de diferentes sistemas de uso são de suma importância, pois servem de base para avaliar o impacto dos principais sistemas de uso na região amazônica e identificar aqueles com maior potencial para causar degradação do solo, permitindo assim, a tomada de decisão e a elaboração de políticas públicas que assegurem a preservação desse patrimônio natural e histórico.

Uma alternativa para manter ou melhorar a fertilidade dos solos antropogênicos, é a utilização de culturas que se caracterizam pelo elevado aporte de material orgânico ao solo. O feijão guandu (*Cajanus cajan*), por exemplo, além de ser amplamente utilizado na alimentação humana e animal, constitui-se em uma das plantas de maior uso como adubação verde, pois possui um sistema radicular profundo e ramificado que, torna-o capaz de resistir ao estresse hídrico e, romper camadas compactadas de solos (AZEVEDO *et al.*, 2007). Além disso, possui crescimento determinado, podendo chegar a quatro metros de altura (ALVINO-RAYOL *et al.*, 2011) e, atingir produção de massa seca entre e 6 a 21 Mg ha<sup>-1</sup> (MOREIRA *et al.*, 2003; SUZUKI; ALVES, 2006).

Por outro lado, estudos realizados por Araújo *et al.* (2011) e Silva Junior *et al.* (2012) em área de vegetação nativa na Amazônia, convertidas em pastagem, verificaram que a MOS tende a decrescer após a mudança de uso do solo de vegetação nativa para pastagem. Em relação a análise espacial em áreas de pastagem, Aquino *et al.* (2014), com pesquisa em áreas de pastagem e floresta na Amazônia, relataram que os atributos químicos em floresta apresentaram maior correlação espacial que a pastagem. Soares *et al.* (2018) ao analisar a MOS em solos antropogênicos sob pastagem, encontraram moderada correlação espacial deste atributo.

Segundo Souza *et al.* (2009), a ferramenta geoestatística, possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem.

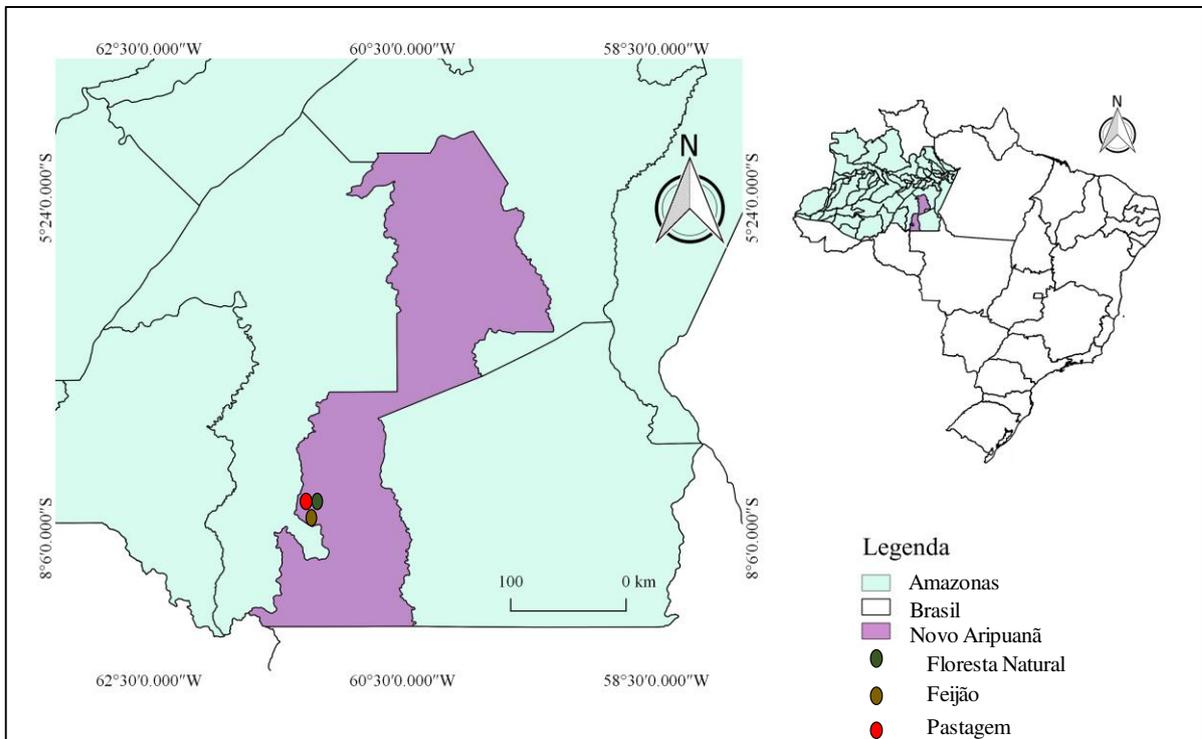
Nesse contexto, o uso da ferramenta geoestatística torna-se importante para modelar cenários com diferentes sistemas de uso do solo, especialmente em áreas de TPAs, visando identificar aqueles com maior potencial para causar a degradação dos atributos químicos do solo. A hipótese desta pesquisa, é que o uso do feijão guandu em solos antropogênicos apresenta menor potencial de degradação dos atributos químicos do solo, devido seu elevado aporte de material orgânico, comparativamente ao uso de pastagem, tendo como referência a floresta natural. Dessa forma, o objetivo deste estudo foi avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo em TPAs sob o uso de feijão guandu, pastagem e floresta natural.

### **3.2 MATERIAL E MÉTODOS**

A área de estudo está localizada no município de Novo Aripuanã, região sul do Amazonas, Brasil, situado ao longo da rodovia Transamazônica, BR-230, com coordenadas geográficas de 07°51'30" de latitude sul e 61°18'01" de longitude oeste (Figura 13). O clima da região é tropical chuvoso, apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade média parcial varia entre 2.250 e 2.750 mm ao ano, com período chuvoso entre outubro e junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25 e 27 °C e a umidade relativa do ar entre 85 e 90% (BRASIL, 1978).

A região apresenta relevo marcado pela presença de platôs nas partes mais elevadas e por planície nas partes mais baixas, que tem como principais características a presença de uma superfície pediplanada, localmente interrompida por colinas de topo plano (CPRM, 2001). O solo foi classificado como Latossolo Amarelo eutrófico argissólico, segundo SiBCS (EMBRAPA, 2013).

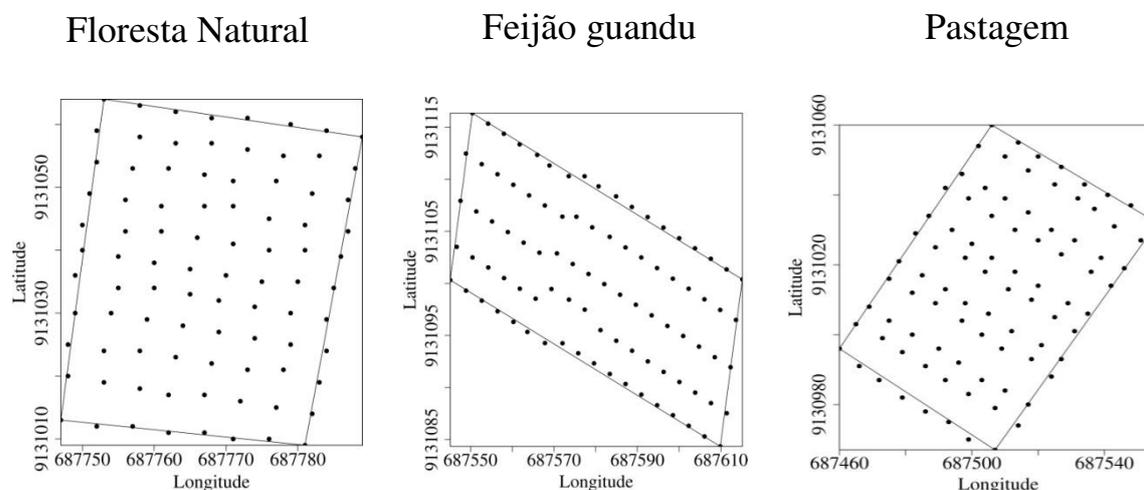
Figura 13 - Localizações dos ambientes de Terra Preta Arqueológica sob os respectivos usos em Novo Aripuanã, Amazonas.



Foram selecionadas três áreas de estudos sobre terra preta arqueológica, submetidas aos seguintes usos: i) mata nativa (Floresta Amazônica) sendo preservada a mais de vinte e cinco anos com árvores secundárias de grande porte, entre quinze e vinte metros de altura; ii) pastagem brachiaria (*Brachiaria brizanta*) com gado de corte da raça nelore, pastejo extensivo, sem presença de divisão de pastos, sem adição de adubos e corretivos no solo; iii) feijão guandu (*Cajanus cajan*), estando coberta com várias plantas trepadeiras nativas, ressaltando que nos últimos 25 anos, as duas últimas áreas, foram cultivadas com milho, feijão e melancia.

Para a coleta dos dados, foram estabelecidas grades amostrais, com 88 pontos para floresta e pastagem cada e, 90 pontos amostrais para o feijão guandu (Figura 14). As malhas tinham as seguintes dimensões: 2.500 m<sup>2</sup> para a floresta, 1.700 m<sup>2</sup> para o feijão guandu e 4.800 m<sup>2</sup> para a pastagem, com espaçamentos regulares entre os pontos de 6 x 6 m, 4 x 5 m e 8 x 8 m, respectivamente. A escolha das dimensões das malhas foi definida no campo, conforme avaliada as dimensões da área de TPAs e a respectiva cobertura representativa do solo. Todos os pontos foram georreferenciados com um sistema de posicionamento global (GPS) Garmin Etrex (South American '69).

Figura 14 - Representação das malhas amostrais e pontos de coleta nas áreas de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, Amazonas.



A amostragem foi realizada em trincheiras confeccionadas nas intersecções das malhas, sendo coletada uma amostra por ponto, nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m para análises dos atributos químicos do solo. Após a coleta, as amostras foram armazenadas em sacos plásticos e secas ao ar (TFSA) e, posteriormente passadas em peneiras com malha de 2,0 mm.

Foram determinados os teores de cátions trocáveis ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^{+}$ ), fósforo disponível (P) e acidez potencial ( $\text{H}^{+} + \text{Al}^{3+}$ ), utilizando-se o método da resina trocadora de íons e, calculado a soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (SB) de acordo com a metodologia proposta por Raij *et al.* (2001). O pH foi determinado potenciométricamente, utilizando-se relação 1:2,5 de solo em água (EMBRAPA, 2017). Determinou-se o carbono orgânico (CO) pelo método Walkley-Black modificado por Yeomans e Bremner (1988). A matéria orgânica do solo (MOS), por sua vez, foi estimada com base no teor de carbono orgânico, pela seguinte equação:

$$\text{MO} = 1,724 \times \text{CO} \quad (13)$$

em que, MO = matéria orgânica do solo; CO = teor de carbono orgânico total na camada amostrada ( $\text{g kg}^{-1}$ ).

A estatística descritiva foi realizada por meio do *software* Minitab (MINITAB, 2000). Determinou-se a análise exploratória dos dados, calculando-se a média, coeficiente de variação (CV), coeficiente de assimetria e teste de normalidade. O CV foi classificado com base no critério de Warrick e Nielsen (1980), que classifica o CV como baixo <12%, médio de 12 a

60% e alto >60%. O teste de normalidade dos dados foi analisado por meio de Kolmogorov-Smirnov.

Para determinar a variabilidade espacial foi utilizada a análise geoestatística (VIEIRA, 2000). O semivariograma experimental foi estimado pela equação (14).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (14)$$

em que,  $\gamma(h)$  = valor da semivariância para uma distância  $h$ ;  $N(h)$  = número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;  $Z(x_i)$  = valor do atributo  $Z$  na posição  $x_i$ ;  $Z(x_i+h)$  = valor do atributo  $Z$  separado por uma distância  $h$  da posição  $x_i$ . Selecionou-se o melhor modelo por meio da validação cruzada (VC) e, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) pelo software GS+.

Os dados dos atributos estudados foram também estimados pelos semivariogramas escalonados, com o objetivo de reduzi-los à mesma escala, facilitando a comparação entre resultados de diferentes variáveis. Os semivariogramas experimentais foram escalonados por meio da divisão das semivariância pela variância amostral de cada variável estudada (VIEIRA, 1997). Com as semivariâncias adimensionalizadas, o efeito pepita expressa diretamente em porcentagem do patamar (semivariância total) o componente aleatório da estrutura de variância.

De acordo com Guimarães (1993), verifica-se proporcionalidade quando os semivariogramas escalonados permitem o ajuste de um único modelo para a variável em estudo. Os semivariogramas experimentais escalonados foram ajustados ao modelo exponencial (Equação 15).

$$\gamma(h) = c_1 + c_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right], \text{ se } h \geq 0 \quad (15)$$

em que,  $C_0$  = efeito pepita;  $C_0 + C_1$  = patamar;  $[(C_0/(C_0 + C_1)) \times 100]$  = grau de dependência espacial;  $h$  = distância de separação entre duas observações;  $a$  = o alcance do semivariograma.

O grau de dependência espacial foi determinado por meio do modelo proposto por Cambardella *et al.* (1994), em que valores de  $[(C_0/(C_0+C_1)) \times 100]$  menores que 25% são considerados com dependência espacial forte, valores de  $[(C_0/(C_0+C_1)) \times 100]$  entre 25 e 75% indicam dependência espacial moderada e valores de  $[(C_0/(C_0+C_1)) \times 100]$  maiores que 75%, dependência espacial fraca.

### 3.3 RESULTADOS

Os dados da estatística descritiva referentes aos atributos químicos são apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5. Todos os atributos químicos nas diferentes camadas apresentaram valores de média e mediana similares, indicando distribuição normal, exceto para o fósforo na camada de 0,00-0,05 m em floresta natural e pastagem, na camada de 0,05-0,10 m em floresta natural e feijão guandu, na camada 0,10-0,20 m para todos os usos em estudo.

O teste de Komogorov-Smirnov, indicou normalidade para a maioria dos atributos químicos estudados (Tabelas 3, 4 e 5). Os valores de assimetria dos atributos químicos foram próximos a zero, indicando simetria dos dados, exceto para o  $Al^{3+}$  na floresta natural nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m e, o  $K^+$  nas camadas de 0,00-0,05 e 0,10-0,20 m para a pastagem e no feijão guandu na camada de 0,05-0,10 m.

Com relação ao grau de variação dos dados, o CV oscilou entre médio, 12 a 60% e, alto  $\geq 60\%$  e, para alguns atributos com CV baixo  $\leq 12\%$  (Tabelas 3, 4 e 5). O pH permaneceu com o CV baixo ( $\leq 12\%$ ) em todas as áreas e camadas estudadas. Nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m o P,  $Al^{3+}$  e  $K^+$  apresentaram alto CV ( $\geq 60\%$ ), para floresta natural, feijão guandu e pastagem, respectivamente. Na camada de 0,10-0,20 m, os mesmos atributos mostraram alto CV.

Na camada superficial, o maior teor de MOS foi para o feijão guandu, seguido da pastagem e floresta natural (Tabela 3). Por outro lado, nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, o teor de MOS foi maior na área com floresta natural, quando comparada aos usos com feijão guandu e pastagem (Tabelas 4 e 5). Além disso, observa-se que os três usos em estudo, mostraram tendência de redução da MOS em profundidade.

Ao analisar a média dos atributos químicos da pastagem em relação a floresta natural, verifica-se, de modo geral, que os valores foram próximos entre si e, em alguns casos até superior a floresta natural (Tabelas 3, 4 e 5). A assimetria deve assumir valor zero, entretanto, os valores apresentaram para a maioria das variáveis ligeiramente diferentes de zero, para o teor de  $Al^{3+}$ ,  $K^+$  e V%.

Quanto ao pH, observa-se valores elevados desse atributo para os diferentes usos e para todas as camadas avaliadas (Tabelas 3, 4 e 5). Os valores de pH em água variaram entre 5,76 a 5,88, para a floresta natural, 6,18 a 6,48 para o feijão guandu e 5,81 a 6,37 para a pastagem. Na camada de 0,00-0,05 m os valores de pH foram menores para todas áreas e, maior na camada de 0,05-0,10 m. Em contrapartida, a acidez potencial revelou valores diferentes entre os usos e camadas, com o aumento para a floresta natural e, diminuição para o feijão guandu e

pastagem em profundidade. Além disso, independente do uso, foram observados valores mais elevados de  $\text{Al}^{3+}$  em profundidade.

Os valores de fósforo foram altos e, com variação entre as áreas, com maiores valores para a pastagem, em que foram observados teores de 27,91 a 28,67  $\text{mg dm}^{-3}$  para a floresta natural, 51,15 a 62,80  $\text{mg dm}^{-3}$  para o feijão guandu e 52,66 a 86,24  $\text{mg dm}^{-3}$  para a pastagem (Tabelas 3, 4 e 5). Em relação as bases  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , verifica-se que há variação desses nutrientes entre as áreas, com maior concentração para o feijão guandu em todas as camadas e o  $\text{Ca}^{2+}$  apenas diferiu na camada de 0,10-0,20 m, sendo maior na floresta natural. O teor de  $\text{K}^+$  mostrou maiores valores nas áreas na camada superficial, apresentando redução em profundidade. Os valores de CTC e V% em ambas as áreas foram maiores na camada superficial, havendo decréscimo em profundidade. A SB apresentou o mesmo comportamento, com maiores valores para área de feijão guandu na primeira e última camada.

Tabela 3 - Estatística descritiva dos atributos químicos do solo das terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,00-0,05 m.

Parâmetros	pH	MOS	P	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SB	CTC	V
	-	g kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>							
Floresta Natural											
Média	5,76	38,00	28,67	5,44	0,10	0,06	6,58	1,38	7,98	13,31	36,88
Mediana	5,75	37,00	21,72	5,12	0,10	0,05	6,70	1,40	8,04	13,34	37,45
DP	0,03	8,00	19,47	1,62	0,04	0,03	1,47	0,38	1,94	2,74	5,21
CV	5,86	20,78	67,91	29,86	42,85	52,74	22,39	28,11	24,42	20,64	14,13
Assimetria	-0,07	0,20	1,57	0,92	7,49	1,29	-0,64	-0,35	-1,13	-0,29	-3,39
d	0,06*	0,08*	0,18*	0,07*	0,05*	0,09*	0,06*	0,04*	0,09 <sup>ns</sup>	0,08*	0,14 <sup>ns</sup>
Feijão Guandu											
Média	6,18	56,72	59,96	6,51	0,23	0,12	7,44	1,33	8,90	15,41	36,50
Mediana	6,17	56,56	57,29	5,94	0,20	0,13	7,40	1,40	8,87	14,95	37,36
DP	0,45	15,96	34,31	2,05	0,15	0,02	1,43	0,34	1,70	2,22	3,94
CV	7,27	28,13	57,23	31,62	65,07	21,18	19,23	25,90	19,09	14,45	10,82
Assimetria	0,17	-0,23	0,63	1,33	1,09	-0,20	0,01	0,11	0,04	0,34	-0,84
d	0,07*	0,05*	0,08*	0,14 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	0,07*	0,05*	0,03*	0,05*	0,08*	0,12 <sup>ns</sup>
Pastagem											
Média	6,36	40,62	86,24	6,58	0,08	0,10	6,55	1,60	8,16	14,74	35,40
Mediana	6,37	39,35	74,27	6,27	0,08	0,08	6,40	1,60	8,13	14,88	35,76
DP	0,19	8,21	41,37	2,00	0,01	0,06	1,06	0,38	1,50	2,39	5,08
CV	3,08	20,49	47,97	30,50	19,24	69,13	16,30	23,86	18,40	16,21	14,35
Assimetria	0,14	0,69	1,42	0,73	1,07	3,23	0,70	0,05	-1,43	-0,31	-3,58
d	0,08*	0,06*	0,14 <sup>ns</sup>	0,09*	0,11 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,07*	0,05*	0,10 <sup>ns</sup>	0,06*	0,11 <sup>ns</sup>

DP = desvio Padrão; CV = coeficiente de variação (%); d = teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) \* significativo a 5% de probabilidade; pH = potencial hidrogeniônico (H<sub>2</sub>O); MOS = matéria orgânica do solo; P = fósforo disponível; H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup> = acidez potencial; Al<sup>3+</sup> = alumínio; K<sup>+</sup> = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = saturação por bases.

Tabela 4 - Estatística descritiva dos atributos químicos do solo de terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,05-0,10 m.

Parâmetros	pH	MOS	P	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SB	CTC	V%
		(g kg <sup>-1</sup> )	(mg/dm <sup>3</sup> )	(cmolc/dm <sup>3</sup> )							
Floresta											
Média	5,88	38,40	28,40	6,43	0,14	0,02	5,88	0,96	6,79	13,16	33,75
Mediana	5,82	39,51	21,97	6,27	0,10	0,03	6,00	0,90	6,90	13,72	34,40
DP	0,49	8,44	22,13	1,63	0,12	0,01	1,37	0,37	1,75	2,57	5,32
CV	8,39	21,98	77,92	25,33	82,82	40,49	23,33	38,64	25,82	19,53	15,78
Assimetria	0,35	-0,11	1,76	0,20	4,15	0,49	-0,63	0,65	-0,90	-0,91	-2,70
d	0,09*	0,08*	0,15 <sup>ns</sup>	0,07*	0,17 <sup>ns</sup>	0,03*	0,05*	0,06*	0,07*	0,11 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>
Feijão											
Média	6,48	31,32	62,80	5,34	0,26	0,12	6,63	0,93	7,47	12,80	35,86
Mediana	6,49	30,60	58,19	5,12	0,30	0,13	6,60	0,90	7,45	12,78	37,56
DP	0,51	8,01	34,18	1,76	0,07	0,02	1,80	0,36	2,33	2,53	7,13
CV	7,86	25,60	54,43	33,05	30,02	21,18	27,18	39,34	31,29	19,81	19,90
Assimetria	0,11	0,43	0,32	0,20	-0,20	-0,20	0,30	0,81	-0,32	-0,39	-2,67
d	0,05*	0,09 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,07*	0,02*	0,07*	0,08*	0,06*	0,05*	0,06*	0,12 <sup>ns</sup>
Pastagem											
Média	6,37	37,50	52,66	5,22	0,11	0,03	6,00	0,95	6,96	12,21	36,36
Mediana	6,42	37,84	50,34	5,20	0,11	0,03	6,00	0,90	7,10	12,10	36,48
DP	0,22	10,78	23,35	1,38	0,01	0,02	0,93	0,34	1,05	1,52	3,33
CV	3,61	28,73	44,34	26,52	12,22	70,12	15,57	36,28	15,20	12,45	9,18
Assimetria	-0,80	0,37	0,63	0,29	-0,27	1,44	0,14	1,03	-0,14	-0,05	-0,25
d	0,08*	0,07*	0,07*	0,04*	0,06*	0,09 <sup>ns</sup>	0,09*	0,06*	0,07*	0,07*	0,06*

DP = desvio Padrão; CV = coeficiente de variação (%); d = teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) \* significativo a 5% de probabilidade; pH = potencial hidrogeniônico (H<sub>2</sub>O); MOS = matéria orgânica do solo; P = fósforo disponível; H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup> = acidez potencial; Al<sup>3+</sup> = alumínio; K<sup>+</sup> = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = saturação por bases.

Tabela 5 - Estatística descritiva dos atributos químicos do solo de terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,10-0,20 m.

Parâmetros	pH	MOS	P	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SB	CTC	V%
		(g kg <sup>-1</sup> )	(mg/dm <sup>3</sup> )	(cmolc/dm <sup>3</sup> )							
Floresta											
Média	5,77	33,68	27,91	6,02	0,29	0,02	5,55	0,79	6,15	12,11	32,53
Mediana	5,69	33,00	23,66	5,78	0,20	0,02	5,70	0,80	6,47	12,73	33,93
DP	0,42	8,85	18,10	1,87	0,19	0,01	1,73	0,33	2,25	3,06	7,97
CV	7,33	26,27	64,86	31,17	67,80	41,21	31,19	41,62	36,54	25,28	24,51
Assimetria	0,67	0,33	1,67	0,62	1,88	0,38	-0,41	0,86	-0,70	-0,62	-2,24
d	0,10 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	0,16 <sup>ns</sup>	0,05*	0,18 <sup>ns</sup>	0,03*	0,07*	0,07*	0,08*	0,09 <sup>ns</sup>	0,16 <sup>ns</sup>
Feijão											
Média	6,29	31,07	51,15	4,98	0,35	0,03	5,45	0,80	6,23	11,20	34,93
Mediana	6,32	31,00	44,76	4,95	0,35	0,02	5,30	0,70	5,95	11,27	36,44
DP	0,61	11,89	29,36	1,73	0,12	0,02	1,76	0,37	2,13	2,25	6,79
CV	9,72	38,29	57,41	34,87	33,65	70,73	32,32	46,65	34,40	20,10	19,45
Assimetria	0,06	0,64	0,66	0,18	0,06	1,17	0,52	1,23	0,34	0,13	-1,50
d	0,04*	0,10 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,08*	0,01*	0,11 <sup>ns</sup>	0,07*	0,12 <sup>ns</sup>	0,07*	0,04*	0,10 <sup>ns</sup>
Pastagem											
Média	5,81	31,63	60,71	4,01	0,08	0,01	5,11	0,61	5,75	9,76	37,28
Mediana	5,84	31,90	50,57	3,63	0,08	0,01	5,05	0,60	5,81	9,79	37,14
DP	0,26	8,99	36,94	1,94	0,02	0,01	1,09	0,25	1,19	2,20	5,13
CV	4,53	28,60	60,84	48,34	30,29	88,51	21,31	41,82	20,85	22,58	13,77
Assimetria	-0,24	0,22	0,69	0,80	5,30	3,06	0,19	2,30	0,04	0,17	-0,38
d	0,06*	0,07*	0,12 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,04*	0,08*	0,06*	0,05*	0,07*

DP = desvio Padrão; CV = coeficiente de variação (%); d = teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) \* significativo a 5% de probabilidade; pH = potencial hidrogeniônico (H<sub>2</sub>O); MOS = matéria orgânica do solo; P = fósforo disponível; H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup> = acidez potencial; Al<sup>3+</sup> = alumínio; K<sup>+</sup> = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = saturação por bases.

Os resultados dos parâmetros geoestatísticos são apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8. O  $R^2$  e VC para a maioria dos atributos químicos nas diferentes camadas e usos, demonstraram valores próximos a 1, revelando ajuste satisfatórios. Os modelos ajustados para os atributos químicos foram o exponencial e esférico.

Na camada de 0,00-0,05 m, o  $K^+$  na área com feijão guandu mostrou efeito pepita puro e, o  $Al^{3+}$  em todos os sistemas de uso do solo obteve efeito pepita puro, este mesmo atributo também apresentou efeito pepita puro para a floresta natural e feijão guandu na camada de 0,10-0,20 m (Tabelas 6, 7 e 8). A pastagem mostrou efeito pepita pura para  $H^+ + Al^{3+}$ ,  $Mg^{2+}$ , CTC e V% na camada de 0,05-0,10 m. Na última camada, o P na área com feijão guandu e V% para a pastagem, apresentaram efeito pepita puro.

Os valores de alcances na camada de 0,00-0,05 m variaram entre 12 a 49 m, para o  $Ca^{2+}$  na floresta natural e  $Mg^{2+}$  na pastagem (Tabelas 6, 7 e 8). Nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, os maiores alcances foram para SB e MOS e os menores para  $Al^{3+}$  e  $Mg^{2+}$ , todos na área com feijão guandu.

Os semivariogramas escalonados são apresentados nas Figuras 16, 17 e 18. Na Figura 16, o grau de dependência (GDE), para todos os sistemas de uso do solo, apresentou  $R^2$  acima de 0,70 e classificadas como moderada entre 25 e 75%. A maior continuidade espacial de 35 m foi observada para a feijão guandu e menor 16 m para pastagem. Para a camada de 0,05-0,10 m, o GDE foi forte para todos os usos, com o  $R^2$  variando entre 0,72 e 0,75 e, com alcance de 38 m para o de feijão guandu. Na camada de 0,10-0,20 m, a floresta natural e o feijão guandu apresentaram GDE forte e a pastagem moderada, o maior alcance foi verificado para o feijão guandu e menor para floresta natural e, os coeficientes de determinação de 0,69, 0,66 e 0,60, floresta, feijão e pastagem, respectivamente.

O planejamento amostral com base no alcance de cada atributo é apresentado nas Tabelas 9, 10 e 11. Analisando individualmente cada atributo na camada de 0,00-0,05 m, a menor densidade amostral foi para SB e CTC na floresta natural e maior para o  $Mg^{2+}$  na pastagem. O feijão guandu na camada de 0,05-0,10 m apresentou para a maioria dos atributos a maior continuidade espacial e, na pastagem menor continuidade espacial. Na camada de 0,10-0,20 m, verificou para a floresta natural a maior continuidade espacial e menor para a pastagem.

Tabela 6 - Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas dos atributos químicos do solo em terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,00-0,05 m.

Parâmetros	pH	MOS	P	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SB	CTC	V
	-	g kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>				cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			%	
Floresta Natural											
Modelo	Exp.	Esf.	Exp.	Exp.	EPP	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Exp.
EP	0,01	30,11	89,80	1,15	-	0,00	1,21	0,08	1,70	3,51	0,01
C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	0,12	60,23	273,10	2,43	-	0,00	2,70	0,17	5,26	8,42	12,94
a	16,80	22,80	30,00	45,00	-	15,35	49,50	35,05	55,70	59,00	13,17
R <sup>2</sup>	0,85	0,93	0,89	0,82	-	0,93	0,97	0,90	0,76	0,93	0,71
VC	0,81	0,83	0,85	0,76	-	0,81	1,00	0,93	0,99	0,88	1,03
Feijão Guandu											
Modelo	Esf.	Esf.	Exp.	Exp.	EPP	EPP	Esf.	Exp.	Esf.	Exp.	Exp.
EP	0,07	77,30	441,00	1,55	-	-	0,79	0,04	1,22	0,92	5,37
C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	0,18	156,20	1053,00	3,16	-	-	1,59	0,09	3,14	5,22	16,85
a	18,90	38,20	19,20	31,20	-	-	39,40	36,60	44,50	15,00	50,00
R <sup>2</sup>	0,80	0,95	0,87	0,85	-	-	0,77	0,82	0,92	0,95	0,66
VC	0,97	0,84	0,69	0,76	-	-	1,02	0,85	0,96	0,73	0,70
Pastagem											
Modelo	Exp.	Esf.	Exp.	Esf.	EPP	Esf.	Esf.	Esf.	Exp.	Exp.	Esf.
EP	0,00	21,84	418,00	1,66	-	0,00	0,26	0,00	0,00	0,15	8,79
C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	0,02	43,69	1373,00	3,55	-	0,00	0,97	0,13	2,59	4,31	36,59
a	14,70	41,70	18,90	21,80	-	47,67	18,75	12,80	17,70	15,00	28,30
R <sup>2</sup>	0,78	0,92	0,92	0,99	-	0,87	0,96	0,76	0,87	0,86	0,89
VC	0,99	0,88	0,75	0,58	-	0,77	0,94	0,96	0,66	0,82	0,63

pH = potencial hidrogeniônico (H<sub>2</sub>O); MOS = matéria orgânica do solo; P = fósforo disponível; H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup> = acidez potencial; Al<sup>3+</sup> = alumínio; K<sup>+</sup> = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = saturação por bases; Exp. = exponencial; Esf. = esférico; C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub> = patamar; a = alcance (m). R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; VC = validação cruzada; EPP = efeito pepita puro.

Tabela 7 - Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas dos atributos químicos do solo em terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,05-0,10 m.

Parâmetros	pH	MOS	P	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SB	CTC	V
	-	g kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>							
Floresta Natural											
Modelo	Exp.	Esf.	Exp.	Exp.	Esf.	Exp.	Exp.	Esf.	Esf.	Exp.	Exp.
EP	0,02	38,20	116,48	0,23	0,00	0,00	0,61	0,07	1,20	2,14	8,44
C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	0,20	80,65	387,49	2,33	0,00	0,00	1,64	0,15	2,41	5,80	16,89
a	16,20	45,20	45,00	12,60	43,78	15,00	25,80	37,00	45,60	39,48	35,10
R <sup>2</sup>	0,95	0,98	0,69	0,88	0,89	0,63	0,89	0,88	0,81	0,95	0,94
VC	0,89	0,97	0,87	0,88	0,78	0,83	0,96	0,98	0,94	0,90	0,83
Feijão Guandu											
Modelo	Esf.	Esf.	Exp.	Exp.	Exp.	Esf.	Esf.	Esf.	Exp.	Esf.	Exp.
EP	0,15	29,40	122,69	1,35	0,00	0,00	1,05	0,05	1,96	0,74	7,90
C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	0,30	66,92	15,43	2,71	0,00	0,00	4,40	0,16	7,45	7,67	42,90
a	36,80	41,30	45,00	36,00	11,10	38,60	49,58	45,30	50,00	45,00	11,00
R <sup>2</sup>	0,82	0,95	0,78	0,85	0,82	0,97	0,93	0,99	0,83	0,85	0,81
VC	1,00	0,94	0,80	0,85	0,85	0,89	0,98	0,94	0,93	0,95	0,86
Pastagem											
Modelo	Esf.	Esf.	Esf.	EPP	Esf.	Exp.	Exp.	EPP	Exp.	EPP	EPP
EP	0,00	59,30	220,00	-	0,00	0,00	0,03	-	0,55	-	-
C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	0,04	118,70	575,80	-	0,00	0,00	0,69	-	1,10	-	-
a	12,40	39,40	22,00	-	13,70	17,10	20,70	-	41,70	-	-
R <sup>2</sup>	0,84	0,89	0,84	-	0,90	0,96	0,82	-	0,86	-	-
VC	0,91	0,70	0,90	-	0,66	0,80	0,72	-	0,78	-	-

pH = potencial hidrogeniônico (H<sub>2</sub>O); MOS = matéria orgânica do solo; P = fósforo disponível; H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup> = acidez potencial; Al<sup>3+</sup> = alumínio; K<sup>+</sup> = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = saturação por bases; Exp. = exponencial; Esf. = esférico; C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub> = patamar; a = alcance (m). R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; VC = validação cruzada; EPP = efeito pepita puro.

Tabela 8 - Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas dos atributos químicos do solo em terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,10-0,20 m.

Parâmetros	pH	MOS	P	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SB	CTC	V
	-	g kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>				cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			%	
Floresta Natural											
Modelo	Exp.	Esf.	Esf.	Esf.	EPP	Exp.	Esf.	Exp.	Esf.	Esf.	Exp.
EP	0,02	40,20	161,80	2,02	-	0,00	1,62	0,01	1,99	4,59	13,95
C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	0,17	91,39	432,30	3,68	-	0,00	3,51	0,11	5,24	9,69	27,91
a	15,00	39,20	52,39	50,00	-	40,17	41,70	14,40	16,70	17,90	38,10
R <sup>2</sup>	0,80	0,95	0,93	0,94	-	0,74	0,93	0,71	0,90	0,91	0,54
VC	0,90	0,88	0,92	0,87	-	0,63	1,00	0,99	0,97	0,92	0,57
Feijão Guandu											
Modelo	Exp.	Exp.	EPP	Exp.	EPP	Exp.	Exp.	Esf.	Exp.	Exp.	Exp.
EP	0,03	65,99	-	0,64	-	0,00	0,26	0,00	0,42	0,65	3,06
C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	0,27	160,31	-	2,34	-	0,00	2,19	0,12	4,29	4,89	27,07
a	9,30	53,00	-	13,80	-	36,83	11,70	8,10	8,70	14,40	10,80
R <sup>2</sup>	0,76	0,84	-	0,72	-	0,77	0,81	0,79	0,73	0,75	0,79
VC	0,79	0,84	-	0,57	-	0,54	0,74	0,66	0,53	0,75	0,64
Pastagem											
Modelo	Exp.	Exp.	Esf.	Exp.	Esf.	Esf.	Exp.	Exp.	Exp.	Esf.	EPP
EP	0,005	30,87	513,36	0,11	0,00	0,00	0,05	0,00	0,001	1,94	-
C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	0,06	78,66	1146,06	2,16	0,00	0,00	0,97	0,05	1,12	5,10	-
a	30,60	34,27	48,42	18,30	20,18	45,30	15,30	18,90	15,90	48,29	-
R <sup>2</sup>	0,81	0,85	0,91	0,79	0,75	0,70	0,68	0,61	0,63	0,95	-
VC	0,73	0,73	0,97	0,73	0,55	0,54	0,82	0,55	0,69	0,86	-

pH = potencial hidrogeniônico (H<sub>2</sub>O); MOS = matéria orgânica do solo; P = fósforo disponível; H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup> = acidez potencial; Al<sup>3+</sup> = alumínio; K<sup>+</sup> = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = saturação por bases; Exp. = exponencial; Esf. = esférico; C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub> = patamar; a = alcance (m). R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; VC = validação cruzada; EPP = efeito pepita puro.

Figura 15 - Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos químicos das terras pretas arqueológicas sob diferentes usos: floresta natural, feijão guandu e pastagem (A, B e C) respectivamente, na camada de 0,00-0,05 m. [modelo (efeito pepita; patamar; alcance, GDE,  $R^2$ )]. MOS = matéria orgânica do solo; pH= potencial hidrogeniônico ( $H_2O$ );  $Al^{3+}$  = alumínio;  $H^+ + Al^{3+}$  = acidez potencial; P = fósforo disponível;  $K^+$  = potássio;  $Ca^{2+}$  = cálcio;  $Mg^{2+}$  = magnésio; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = saturação por bases; Exp. = exponencial.

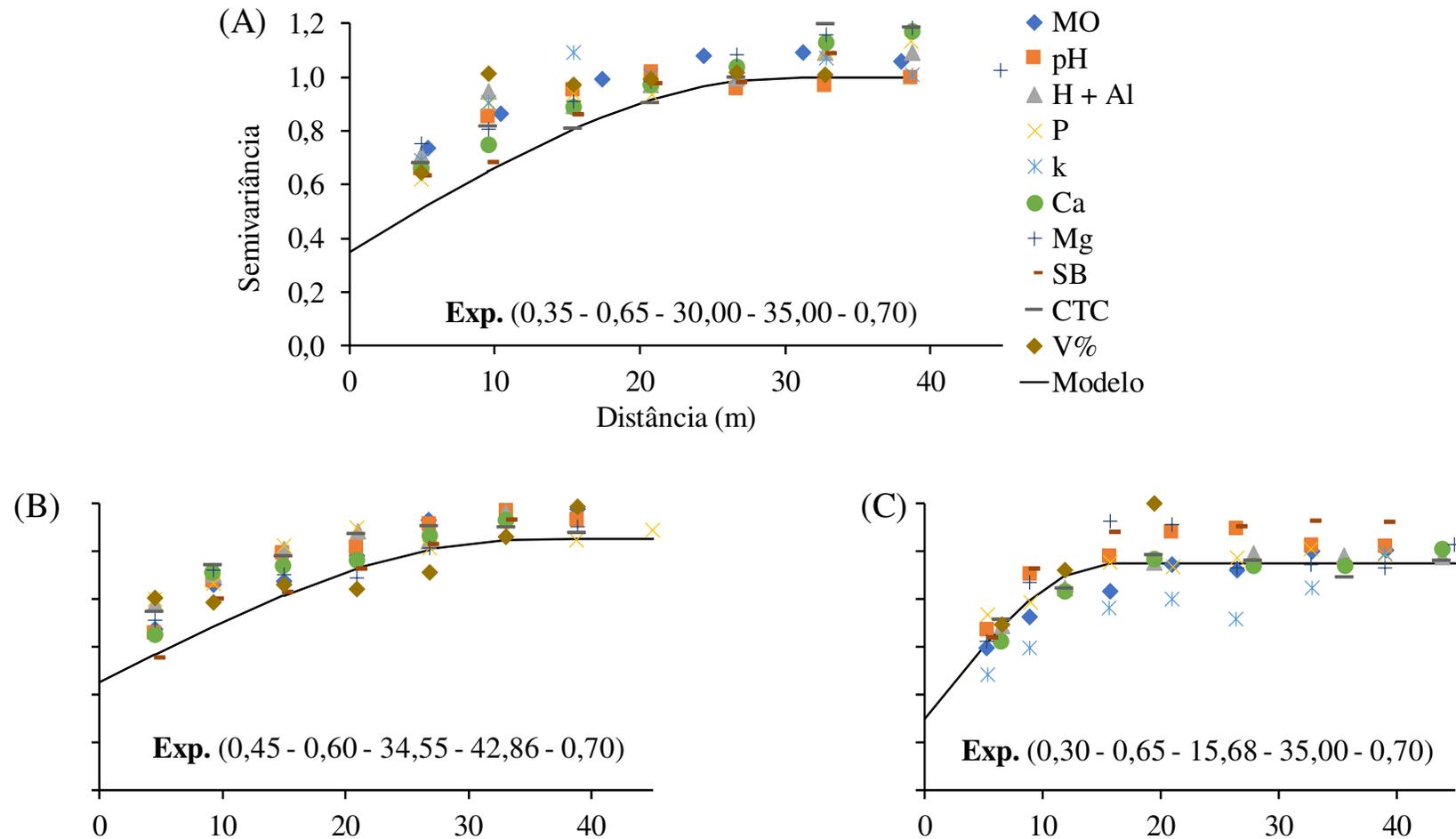


Figura 16 - Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos químicos das terras pretas arqueológicas sob diferentes usos: floresta natural, feijão guandu e pastagem (D, E e F) respectivamente, na camada de 0,05-0,10 m. [modelo (efeito pepita; patamar; alcance, GDE,  $R^2$ )]. MOS = matéria orgânica do solo; pH= potencial hidrogeniônico ( $H_2O$ );  $Al^{3+}$  = alumínio;  $H^+ + Al^{3+}$  = acidez potencial; P = fósforo disponível;  $K^+$  = potássio;  $Ca^{2+}$  = cálcio;  $Mg^{2+}$  = magnésio; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = saturação por bases; Exp. = exponencial.

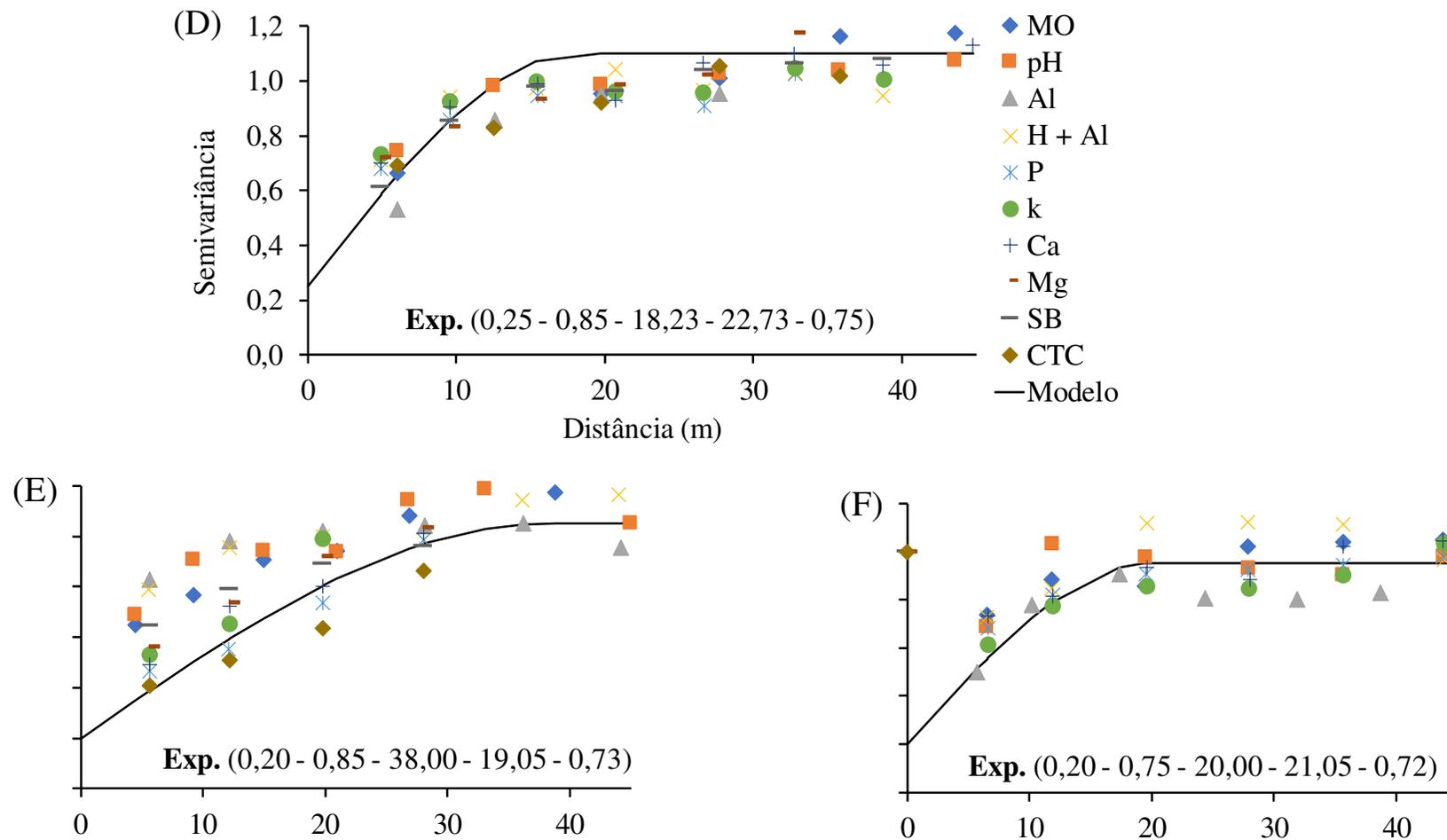


Figura 17 - Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos químicos das terras pretas arqueológicas sob diferentes usos: floresta natural, feijão guandu e pastagem (G, H e I) respectivamente, na camada de 0,10-0,20 m. [modelo (efeito pepita; patamar; alcance, GDE,  $R^2$ )]. MOS = matéria orgânica do solo; pH= potencial hidrogeniônico ( $H_2O$ );  $Al^{3+}$  = alumínio;  $H^+ + Al^{3+}$  = acidez potencial; P = fósforo disponível;  $K^+$  = potássio;  $Ca^{2+}$  = cálcio;  $Mg^{2+}$  = magnésio; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = saturação por bases; Exp. = exponencial.

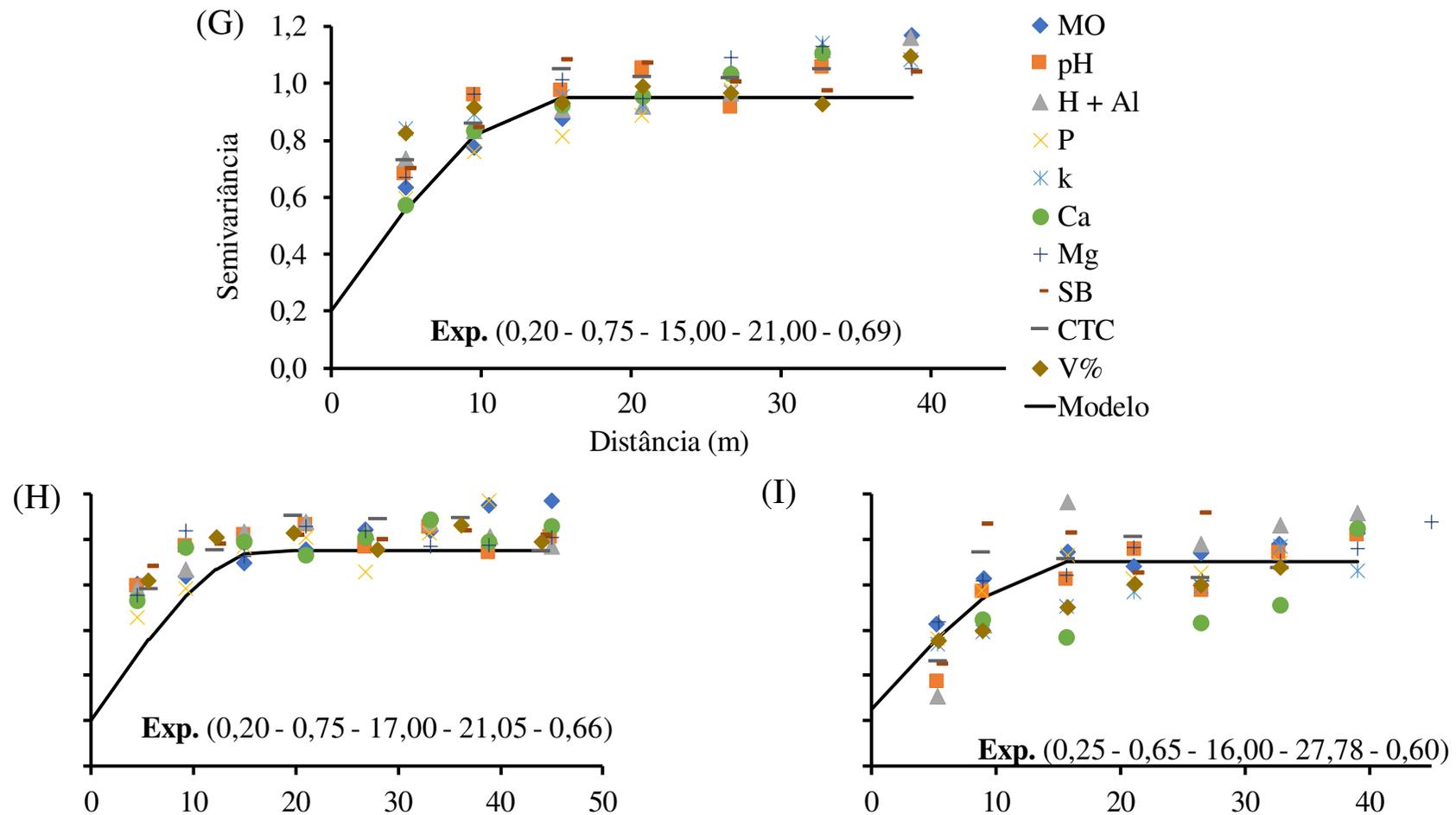


Tabela 9 - Densidade amostral mínima com base no alcance dos semivariogramas para atributos químicos em áreas de terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,00-0,05 m.

Atributos	Floresta Natural		Feijão Guandu		Pastagem	
	Dens. Amostral	Espaçamento	Dens. Amostral	Espaçamento	Dens. Amostral	Espaçamento
	pontos ha <sup>-1</sup>	m	pontos ha <sup>-1</sup>	m	pontos ha <sup>-1</sup>	m
MOS	20	23	7	28	6	41
pH	35	17	28	19	46	15
Al <sup>3+</sup>	-	-	-	-	-	-
H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	5	45	10	31	21	22
P	11	30	27	19	28	19
K <sup>+</sup>	43	15	-	-	4	48
Ca <sup>2+</sup>	4	50	6	39	28	19
Mg <sup>2+</sup>	8	35	7	37	61	13
SB	3	56	5	45	32	18
CTC	3	59	44	15	44	15
V%	53	14	4	50	12	28
S.E.	11	30	5	43	8	36

MOS = matéria orgânica do solo; pH = potencial hidrogeniônico (H<sub>2</sub>O); Al<sup>3+</sup> = alumínio; H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup> = acidez potencial; P = fósforo disponível; K<sup>+</sup> = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; SB = soma de bases; CTC= capacidade de troca catiônica; V%= saturação por bases; S.E. = semivariograma escalonado.

Tabela 10 - Densidade amostral mínima com base no alcance dos semivariogramas para atributos químicos em áreas de terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,05-0,10 m.

Atributos	Floresta Natural		Feijão Guandu		Pastagem	
	Dens. Amostral	Espaçamento	Dens. Amostral	Espaçamento	Dens. Amostral	Espaçamento
	pontos ha <sup>-1</sup>	m	pontos ha <sup>-1</sup>	m	pontos ha <sup>-1</sup>	m
MOS	5	45	6	41	6	39
pH	38	16	7	37	65	12
Al <sup>3+</sup>	5	44	81	11	53	14
H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	63	13	8	36	-	-
P	5	45	5	45	21	22
K <sup>+</sup>	44	15	7	39	34	17
Ca <sup>2+</sup>	15	26	4	50	23	21
Mg <sup>2+</sup>	7	37	5	45	-	-
SB	5	46	4	50	6	42
CTC	6	39	5	45	-	-
V%	8	35	83	11	-	-
S.E.	30	18	7	38	25	20

MOS = matéria orgânica do solo; pH = potencial hidrogeniônico (H<sub>2</sub>O); Al<sup>3+</sup> = alumínio; H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup> = acidez potencial; P = fósforo disponível; K<sup>+</sup> = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; SB = soma de bases; CTC= capacidade de troca catiônica; V% = saturação por bases; S.E. = semivariograma escalonado.

Tabela 11 - Densidade amostral mínima com base no alcance dos semivariogramas para atributos químicos em áreas de terras pretas arqueológicas sob diferentes usos, na camada de 0,10-0,20 m.

Atributos	Floresta Natural		Feijão Guandu		Pastagem	
	Dens. Amostral	Espaçamento	Dens. Amostral	Espaçamento	Dens. Amostral	Espaçamento
	pontos ha <sup>-1</sup>	m	pontos ha <sup>-1</sup>	m	pontos ha <sup>-1</sup>	m
MOS	7	39	4	53	9	34
pH	44	15	116	9	11	31
Al <sup>3+</sup>	-	-	-	-	25	20
H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	4	50	53	14	30	18
P	4	52	-	-	4	48
K <sup>+</sup>	6	40	7	37	5	45
Ca <sup>2+</sup>	6	42	73	12	43	15
Mg <sup>2+</sup>	48	14	152	8	28	19
SB	36	17	132	9	40	16
CTC	31	18	48	14	4	48
V%	7	38	86	11	-	-
S.E.	23	21	35	17	39	16

MOS = matéria orgânica do solo; pH = potencial hidrogeniônico (H<sub>2</sub>O); Al<sup>3+</sup> = alumínio; H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup> = acidez potencial; P = fósforo disponível; K<sup>+</sup> = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; SB = soma de bases; CTC= capacidade de troca catiônica; V% = saturação por bases; S.E. = semivariograma escalonado.

### 3.4 DISCUSSÃO

De maneira geral, observa-se que a fertilidade das TPAs sob diferentes usos segue distribuição heterogênea em superfície, com tendência a homogeneidade em profundidade. Em todas as áreas estudadas o teor de MOS foi elevado, sendo observadas diferenças para os sistemas de uso. Além disso, constatou-se que independentemente do uso, há redução no teor de MOS em profundidade, sendo esse comportamento contrário para o  $Al^{3+}$ , ou seja, quanto menor teor de MOS maior o teor de  $Al^{3+}$ .

Normalmente, a MOS se decompõe rapidamente em solos sob clima tropical, porém, em TPAs o carbono pirogênico é resistente e aumenta a capacidade de retenção de água e nutrientes em longo prazo no solo (ARAÚJO *et al.*, 2015). Diversos estudos relatam o elevado teor de MOS de TPAs em comparação aos outros tipos de solos, os quais pode citar: Chagas *et al.* (2017), que afirmaram que solos antropogênicos apresentam até três vezes mais teor MOS que solos adjacentes. Para Moreira (2007) o alto teor de MOS dos solos antropogênicos é atribuído por serem constituídos em sua grande parte por substâncias húmicas mais estáveis, de difícil degradação. Neste sentido, Cunha *et al.* (2017), confirmam que as condições bioclimáticas com elevadas temperaturas e precipitação, favorecem o acúmulo de MOS mais estável à decomposição.

Para a camada de 0,00-0,05 m o feijão guandu apresentou maior teor MOS quando comparado aos demais sistemas de uso e, para as camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m a floresta natural se destacou. O elevado teor de MOS no feijão guandu na camada superficial pode ser atribuído à adição de material orgânico proporcionado pela cultura. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Cunha *et al.* (2017) que avaliaram os atributos físicos e o carbono orgânico em áreas de TPAs sob os cultivos feijão guandu, pastagem e floresta e, observaram elevados teores de carbono orgânico para o uso de feijão guandu na camada 0,00-0,05 m. Os autores justificaram que esses resultados foram influenciados pelas altas concentrações de cobertura vegetal verificadas *in loco* sob o uso do feijão Guandu.

Os elevados valores de MOS, acidez potencial e SB para área com feijão guandu e a pastagem na camada de 0,00-0,05 m contribuíram conseqüentemente para maiores valores de CTC. Na camada de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, a floresta natural apresentou maior CTC associado principalmente à acidez potencial. Esse resultado está de acordo com os observados por Cunha *et al.* (2011), que avaliaram os atributos químicos influenciados por planta de cobertura e, encontraram resultados próximos aos desse estudo.

As diferenças nas concentrações do P nas áreas em estudo podem ser justificadas ao uso agrícola do solo, a localização e, a densidade da ocupação das populações indígenas nas

áreas, tendo em vista que esse atributo químico se apresenta com baixa uniformidade nas TPAs. Para Lemos *et al.* (2011), o P é um elemento em abundância em TPAs e sua origem é devido a atividade dos povos indígena pela adição de material orgânico, espinhas de peixes, ossos humanos e animais e, carapaças de quelônios. Em estudo com a fertilidade de TAPs, Falcão e Borges (2006), verificaram variação em sítios arqueológicos quanto a concentração P oscilando de 519,21 a 388,79  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ . Da mesma forma, Silva *et al.* (2011) em caracterização química de solos antropogênicos, observaram que os teores de P variaram de 23 a 955  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ .

Verificou-se que o maior e menor coeficientes de variação ocorreu para o uso de pastagem, com 3,08% para o pH na camada de 0,00-0,05 m e 88,51% para o  $\text{K}^+$  na camada de 0,10-0,20 m. Em todas as áreas em estudo o pH foi o atributo que mostrou a menor variabilidade dos dados, classificado como baixo (CV <12%). Observou valores altos (CV >60%) para os seguintes atributos: P na floresta natural em todas as camadas e a pastagem na camada de 0,10-0,20 m; o  $\text{Al}^{3+}$  para o feijão guandu na camada de 0,00-0,05 m e na floresta natural para camadas 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m; e o  $\text{K}^+$  na pastagem em todas as camadas. Os demais atributos mostraram valores de coeficiente com média variação (12 a 60%). Os elevados coeficientes de variação (CV >60%) revela a existência de um conjunto de dados mais heterogêneo, indicando que a média não tem significado algum. Esses resultados corroboram com os obtidos por Aquino *et al.* (2014), que identificou CV baixo para o pH tanto na pastagem quanto para floresta e, alto CV para o  $\text{K}^+$  na pastagem.

O teste Komogorov-Smirnov mostrou normalidade para maioria dos atributos, para análise geoestatística, a condição de normalidade não é obrigatória. Segundo Isaaks e Srivastava (1989), é recomendado que a distribuição dos dados não apresente caudas muito alongadas. Os valores de assimetria ficaram próximos de zero para a maioria dos atributos, indicando simetria dos dados, com exceção ao P,  $\text{K}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  que apresentaram valores positivos, indicando distribuição assimétrica à direita. Ressalta-se, que esses mesmos atributos foram os que apresentaram maiores coeficientes de variação. Elevados valores de assimetria e coeficientes de variação para o  $\text{K}^+$  e P, também foi encontrado por Oliveira *et al.* (2015b) em solo antropogênico.

Os modelos teóricos que melhor se ajustaram aos dados dos atributos químicos foram o esférico e o exponencial. Ao analisar o alcance de cada atributo nas suas respectivas áreas, observa-se que os atributos exibiram menor variabilidade, garantido melhor precisão nas estimativas em locais não amostrados. Na camada de 0,00-0,05 m, os maiores alcances foram observados na área de floresta natural; para camada de 0,05-0,10 m, foi para o feijão guandu e

na camada de 0,10-0,20 m para a pastagem. Esses valores elevados de alcances indicam menor variabilidade dos dados e fornecem informação da distribuição espacial para cada área de estudo. Quanto aos valores de  $R^2$  e VC, foram próximos a 1, com exceções para alguns atributos, sendo estes valores de  $R^2$  e VC associados aos demais parâmetros, afirmam que o modelo ajustado teve ótima precisão.

Em relação ao ajuste dos semivariogramas escalonados, o modelo que melhor se ajustou aos atributos químicos, foi o exponencial em todas as camadas. Os semivariogramas escalonados em cada camada apresentou uma classificação de grau de dependência, para a camada de 0,00-0,05 m todos os usos foram classificados como moderada, valores entre 25 a 75%. A camada de 0,05-0,10 m, revelou forte dependência espacial (< 25%) em todos os usos. Na camada mais profunda, a floresta natural e o feijão guandu foram classificados como forte dependência espacial e a pastagem como moderada dependência espacial. Nenhum sistema de uso do solo mostrou dependência espacial fraca, afirmando que estas revelam correlação espacial dos seus atributos. De modo geral, os atributos que exibiram forte dependência espacial são influenciados por fatores intrínsecos do solo.

Analisando os valores do alcance, verificou-se que área de feijão guandu obteve maior continuidade espacial em todas as camadas na ordem de 34,55, 38,00 e 17,00 m, nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente. Isso é um indicativo da baixa variabilidade em relação a floresta natural e pastagem. Nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, os valores de alcances tanto para floresta natural quanto para a pastagem foram próximos, de 18,23 e 20,00 e, 15,00 e 16,00 m, respectivamente.

De acordo com os valores de alcance, verifica-se que a floresta natural e a pastagem possivelmente apresentam maior variabilidade dos dados e menor continuidade espacial em relação ao feijão guandu. Os atributos que apresentaram dependência espacial mostraram alcances maiores que o estabelecido nas malhas amostrais, sendo dessa forma, este parâmetro utilizado para determinar a densidade amostral mínima para cada atributo em todos os usos e camadas. Quanto ao alcance dos semivariogramas escalonados, este serviu para distinguir a densidade amostral mínima do conjunto dos atributos entre as áreas estudadas.

Os  $R^2$  dos semivariogramas escalonados foram maiores na camada de 0,00-0,05 m com valores acima de 0,70 e menor na camada de 0,10-0,20 m com valores acima de 0,60. De modo geral, a continuidade espacial e o ajuste dos semivariogramas foram elevados na camada de 0,00-0,05 m, pois à medida que avança há diminuição em seus valores, indicando que na camada superficial a correlação espacial entre os atributos químicos é mais forte que em camadas mais profundas. Resultados semelhantes foram observados por Tavares *et al.* (2012)

e Corado Neto *et al.* (2015).

Analisando a densidade amostral mínima de cada atributo em seus respectivos sistemas de uso do solo, identificou que a variação dos pontos  $\text{ha}^{-1}$ . Na camada de 0,00-0,05 m, na floresta natural variou de 3 a 53, feijão guandu de 4 a 27 e pastagem 4 a 61 pontos  $\text{ha}^{-1}$ . Na camada de 0,05-0,10 m, a floresta natural oscilou de 5 a 46, o feijão guandu de 5 a 81 e a pastagem de 6 a 53 pontos  $\text{ha}^{-1}$  e na camada de 0,10-0,20 m, a floresta natural variou de 4 a 48, o feijão guandu de 4 a 152 e a pastagem de 4 a 53 pontos  $\text{ha}^{-1}$ .

O semivariograma escalonado na camada de 0,00-0,05 m por meio da continuidade espacial, evidenciou menor variabilidade para o feijão guandu, com densidade amostral mínima de 5 pontos  $\text{ha}^{-1}$  e, maior variabilidade para floresta natural e pastagem com 11 e 8 pontos  $\text{ha}^{-1}$ , respectivamente. Na camada de 0,05-0,10 m verificou comportamento similar a camada superficial, na camada de 0,10-0,20 m observou que a floresta natural apresentou menor densidade amostral mínima (23 pontos  $\text{ha}^{-1}$ ), seguido do feijão guandu 35 pontos  $\text{ha}^{-1}$  e pastagem 39 pontos  $\text{ha}^{-1}$ . De modo geral, o feijão guandu mostrou um comportamento mais homogêneo nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,010 m em relação a floresta natural e pastagem, havendo aumento da densidade amostral somente na camada de 0,10-0,20 m. Isto implica a reafirmar que, este trabalho pode servir como subsídio para pesquisas futuras com amostragem de solo e, que neste caso podem ser utilizados os valores de alcance encontrados na pesquisa.

### 3.5 CONCLUSÕES

O feijão guandu aumentou a fertilidade dos solos antropogênicos em relação a pastagem na camada superficial, por meio do alto teor de matéria orgânica.

Houve diminuição do teor de matéria orgânica em camada para todos os usos e acréscimo de  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ . O teor de P apresentou variação entre os sítios arqueológicos.

A densidade amostral apresentou uma menor variabilidade e maior continuidade espacial para o feijão guandu em relação a pastagem e floresta natural para as camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m e, na última camada a floresta natural evidenciou maior continuidade espacial e menor variabilidade.

### 3.6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVINO-RAYOL, F. O.; ROSA, L. S.; RAYOL, B. P. Efeito do espaçamento e do uso de leguminosas de cobertura no manejo de plantas invasoras em reflorestamento de *schizolobium amazonicum* huber ex. ducke (paricá). **Revista Árvore**, Viçosa, v.35, n.3, p.391-399, 2011.

AQUINO, R. E.; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; SIQUEIRA, D. S. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.44, n.1, p.32-41, 2014.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impacto da conversão floresta-pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta Amazônica**, Manaus, v.41, n.1, p.103-114, 2011.

ARAÚJO, S. R.; SÖDERSTRÖM, M.; ERIKSSON, J.; ISENDAHL, C.; STENBORG, P.; DEMATTÊ, J. A. M. Determining soil properties in Amazonian Dark Earths by reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.237-238, n.1, p.308-317, 2015.

AZEVEDO, R. L.; RIBEIRO, F. T.; AZEVEDO, C. L. L. Feijão guandu: uma planta multiuso. **Revista da Fapese**, São Cristóvão, v.3, n.1, p.81-86, 2007.

BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V.; CANELLAS, L. P.; KERN, D. C. Fracionamento químico da matéria orgânica e caracterização física de Terra Preta de Índio. **Revista Ciência Agrária/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v.55, n.1, p.44-51, 2012.

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

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 Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CHAGAS, L. F. B.; FALCÃO, N. P. S.; PADILHA, F. J.; OLIVEIRA, D. M.; GUIMARÃES, R. S.; CAMPOS, D. V. B.; MALVERDE, E. M.; FERREIRA, P. H. Z.; SOARES, R. Avaliação do impacto do cultivo de citros sobre os Estoques de carbono e Nitrogênio das frações leves da matéria orgânica de solos antrópicos (Terras Pretas de Índio) e solos adjacentes (Latosolos) da Amazônia Central. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v.9, n.5, p.2067-2081, 2017.

CORADO NETO, F. C.; SAMPAIO, F. M.; VELOSO, M. E.; MATIAS, S. S. R.; ANDRADE, F. R.; LOBATO, M. G. R. Variabilidade espacial dos agregados e carbono orgânico total em Neossolo Litólico Eutrófico no município de Gilbués, PI. **Revista Ciência Agrária/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v.58, n.1, p.75-83, 2015.

CPRM. Centro de Pesquisa de Recursos Minerais. **Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens**. Manaus, 2001. 93p. (Relatório Técnico).

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; DIDONE, A. D.; FERREIRA, E. P. B.; MOREIRA, J. A. A. LEANDRO, W. M. Atributos químicos do solo sob produção orgânica influenciados pelo preparo e por plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.10, p.1021-1029, 2011.

CUNHA, J. M.; GAIO, D. C.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; SILVA, D. M. P.; LIMA, A. F. L. Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica da Amazônia. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v.12, n.2, p.263-281, 2017.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3ª edição revista e ampliada, Brasília: Embrapa, 2017. 573p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

FALCÃO, N. P. S.; BROGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (*Carica papaya L.*). **Acta Amazônica**, Manaus, v.36, n.4, p.401-406, 2006.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um Latossolo Roxo**. 1993. 138 f. Dissertação (Universidade Estadual de Campinas) Campinas.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied**. Oxford: University Press, 1989, 561p.

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

LEMONS, V. P.; MEIRELES, A. R. O.; FERNANDES, K. G.; MORAES, M. C.; COSTA, M. L.; SILVA, A. K. T.; KERN, D. C. Nutrients in Amazonian black earth from Caxiuanã Region. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, Campinas, v. 22, n.4, p.772-779, 2011.

MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; BENITES, V. M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In: TEIXEIRA, W.G.; KERN, D.C.; MADARI, B.E.; LIMA, H.N.; WOODS, W. (Eds.). **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: 2009. Cap.13, p.172-188.

MINITAB Release 14.1, **Statistical Software**. US/Canadá. 2000.

MOREIRA, A. Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia Ocidental. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.2, p.307-315, 2007.

MOREIRA, V.F.; PEREIRA, A. J.; GUERRA, J. G. M.; GUEDES, R. E.; COSTA, J. R. **Produção de biomassa de gandu em função de diferentes densidades e espaçamentos entre sulcos de plantio**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2003. 5 p.

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

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; SIQUEIRA, D. S.; CUNHA, J. M. Variabilidade espacial e densidade amostra da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.3, p.668-681, 2015b.

RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.

SILVA JÚNIOR, C. A.; BOECHAT, C. L.; CARVALHO, L. A. Atributos químicos do solo sob conversão de floresta Amazônica para diferentes sistemas na região Norte do Pará, Brasil. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.28, n.4, p.566-572, 2012.

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

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; CUNHA, J. M. C.; MANTOVANELLI, B. C.; OLIVEIRA, BRITO FILHO, E. G.; LEITE, A. F. Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Gaia Scientia**, Recife, v.12, n.2, p.125-133, 2018.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.1, p.48-56, 2009.

SUZUKI, L. E. A. S.; ALVES, M. C. Fitomassa de plantas de cobertura em diferentes sucessões de culturas e sistemas de cultivo. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.1, p.121-127, 2006.

TAVARES, U. E.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; MONTENEGRO, A. A. A.; MAGALHÃES, A. G.; BARROS, M. T. L. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.11, p.1206-1214, 2012.

VIEIRA SR. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, p.181-190, 1997.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v.1, p.1-53.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. Cap.2, p.319-344.

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

## **CAPÍTULO IV: O TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA REDUZ A PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO EM SOLOS ANTROPOGÊNICOS**

### **RESUMO**

A intensa pressão das ações antrópicas sobre solos antropogênicos, pode promover a sua alteração estrutural. O objetivo deste estudo, foi verificar a estrutura mecânica de solos antropogênicos sob usos de feijão guandu e pastagem, por meio da pressão de preconsolidação, tendo como referencial a floresta natural. A pesquisa foi desenvolvida no município de Novo Aripuanã, no sul do Amazonas, em um Latossolo Amarelo eutrófico argissólico, onde foram coletadas amostras indeformadas e deformadas nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, para determinação dos atributos do solo, tais como: densidade do solo, diâmetro médio ponderado, resistência do solo à penetração, macroporosidade, microporosidade, textura do solo (areia, silte e argila), argila dispersa em água (ADA), índice de floculação (IF%) e matéria orgânica do solo. As amostras indeformadas foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial. Os resultados indicam que os teores de matéria orgânica foram mais elevados na camada superficial para os três sistemas de uso do solo, ocorrendo decréscimo em profundidade. O elevado teor de matéria orgânica na camada superficial proporcionou menor pressão de preconsolidação nos usos de pastagem e feijão guandu. A densidade do solo, microporosidade, diâmetro médio ponderado e resistência do solo à penetração do solo afetados pelo pisoteio animal favoreceram a maior capacidade de suporte de carga para o uso de pastagem. Com redução da coesão devido ao aumento do conteúdo de água, a floresta natural nas duas camadas analisadas, revelou ser mais suscetível ao processo compressivo que os usos de pastagem e feijão guandu.

**Palavras-chaves:** Compactação do solo, terra preta de índio, capacidade de suporte de carga, manejo do solo.

## CHAPTER IV: THE ORGANIC MATTER CONTENT REDUCES THE PRESSURE OF PRECONSOLIDATION IN ANTHROPOGENIC SOILS

### ABSTRACT

The intense pressure of anthropogenic actions on anthropogenic soils can promote their structural alteration. The objective of this study was to verify the mechanical structure of anthropogenic soils using pigeon pea and pasture, by means of preconsolidation pressure, with natural forest as reference. The research was carried out in the city of Novo Aripuanã, in the south of Amazonas, in an Oxisol eutrophic Yellow Latosol, where undisturbed and deformed samples were collected in the layers of 0.00-0.10 and 0.10-0.20 m, to determine the soil attributes, such as: soil density, weighted average diameter, soil penetration resistance, macroporosity, microporosity, soil texture (sand, silt and clay), water dispersed clay (ADA), flocculation index (IF%) and soil organic matter. The undisturbed samples were submitted to the uniaxial compression test. The results indicate that the organic matter contents were higher in the superficial layer for the three uses, with a decrease in layer. The high content of organic matter in the superficial layer provided less pressure of preconsolidation in the uses of grazing and pigeon pea. Soil density, microporosity, weighted mean diameter and soil resistance to soil penetration affected by animal trampling favored the higher load bearing capacity for pasture use. With reduced cohesion due to increased water content, the natural forest in the two layers analyzed was more susceptible to the compressive process than the pasture and pigeonpea uses.

**Key words:** Soil compaction, black indian soil, load bearing capacity, soil management.

## 4.1 INTRODUÇÃO

Diferentemente da maioria dos solos tropicais, as terras pretas arqueológicas (TPAs) ou "terra preta de índio" contêm grandes quantidades de matéria orgânica estável no solo e são altamente férteis (GERMANO *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2018). Acredita-se que a formação desses solos escuros e férteis esteja relacionada a ação antrópica, por meio da deposição de resíduos orgânicos em combinação com atividades de queimadas (KAWA *et al.*, 2015). Assim, a existência de TPAs, demonstra que a melhoria dos solos tropicais altamente intemperizados pelas ações humanas é possível (GLASER; BIRK, 2012).

Nesse contexto, as TPAs têm sido objeto de estudos multidisciplinares que buscam compreender sua formação (MACEDO *et al.*, 2017). Entretanto, em função das características adequadas para o cultivo, essas áreas também têm despertado o interesse de agricultores da região e, em consequência grandes áreas nativas de TPAs estão sendo convertidas em pastagem, levando à degradação do solo (SOARES *et al.*, 2015).

A mudança no uso da terra, por exemplo, a conversão de floresta ou pastagem natural em pastagem ou lavouras comerciais, remove a biomassa, altera a vegetação e perturba os solos, levando em última instância, à perda de carbono do solo e outros nutrientes, mudanças nos atributos do solo e mudanças na biodiversidade acima e abaixo do solo (SMITH *et al.*, 2016). Tisdall e Oades (1982) relatam que a agricultura intensa é responsável pela remoção da matéria orgânica do solo, a qual é um dos principais agentes de formação e estabilização de agregados. Em solos antropogênicos sob pastagem, Soares *et al.* (2015), afirmam que devido ao pisoteio animal, há aumento da densidade do solo e resistência do solo à penetração. Em concordância, Moline e Coutinho (2015), concluíram que há degradação química do solo sob uso de pastagem nos solos antropogênicos.

Uma das alternativas para as áreas em que houve a retirada da cobertura vegetal, é implantação da cultura feijão guandu (*Cajanus cajan*). Para Brazaca *et al.* (1996) o feijão guandu apresenta sistema radicular profundo, sendo capaz de se desenvolver em solos com tendência em formar crosta na superfície. Em complemento, Rayol *et al.* (2012) realizaram um estudo com adubação verde e manejo agroecológico de plantas espontâneas em reflorestamento e, relataram que o feijão guandu apresenta vários benefícios ao ser utilizado como adubação verde em áreas de reflorestamento no estado do Pará.

É importante observar que a maioria dos estudos em solos antropogênicos apenas analisa os atributos (densidade do solo, resistência do solo à penetração, macroporosidade, microporosidade e diâmetro médio ponderado), entretanto, são incipientes pesquisas que trataram a investigar a capacidade de suporte de carga (CSCS) neste solo. Para Dias Júnior e

Pierce (1996), a compressibilidade do solo é definida como a facilidade com que o solo não saturado decresce de volume quando sujeito a pressões, sendo função de fatores externos e internos. Segundo este mesmo autor, as curvas de compressão uniaxial admitem a determinação da pressão de preconsolidação do solo, como indicador da capacidade de suporte de carga.

A exploração de Terras Pretas Arqueológicas promove pressão de preconsolidação diferenciada pelos diferentes manejos estudados (feijão guandu e pastagem), tendo como referência a mata nativa em função do teor de matéria orgânica do solo. Dessa maneira, o objetivo deste estudo, foi verificar a estrutura mecânica de solos antropogênicos sob uso de feijão guandu e pastagem, por meio da pressão de preconsolidação, tendo como referencial a floresta natural.

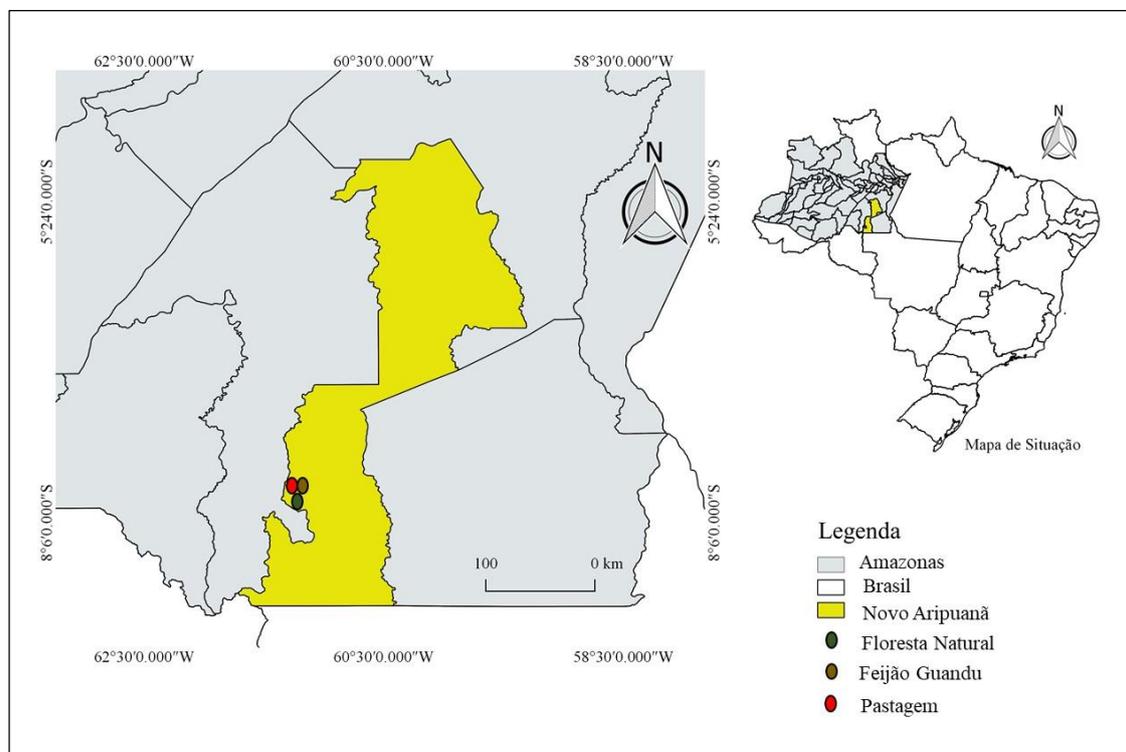
## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada no município de Novo Aripuanã, região sul do Amazonas, Brasil, situado ao longo da rodovia Transamazônica, BR-230, com coordenadas geográficas de 07°51'30" de latitude sul e 61°18'01" de longitude oeste (Figura 18). O clima da região é o tropical chuvoso, apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade média parcial varia entre 2.250 e 2.750 mm ao ano, com período chuvoso entre outubro e junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25 e 27 °C e a umidade relativa do ar entre 85 e 90% (BRASIL, 1978).

A região apresenta relevo marcado pela presença de platôs nas partes mais elevadas e por planície nas partes mais baixas, que tem como principais características a presença de uma superfície pediplanada, localmente interrompida por colinas de topo plano (CPRM, 2001). O solo foi classificado como Latossolo Amarelo eutrófico argissólico, segundo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2013).

Foram selecionadas três áreas de estudos sobre terra preta arqueológica, submetidas aos seguintes usos: i) mata nativa (Floresta Amazônica) sendo preservada a mais de vinte e cinco anos com árvores secundárias de grande porte, entre quinze e vinte metros de altura; ii) pastagem brachiaria (*Brachiaria brizanta*) com gado de corte da raça nelore, pastejo extensivo, sem presença de divisão de pastos, sem adição de adubos e corretivos no solo; iii) feijão guandu (*Cajanus cajan*), estando coberta com várias plantas trepadeiras nativas, ressaltando que nos últimos 25 anos, as duas últimas áreas, foram cultivadas milho, feijão e melancia.

Figura 18 – Localização das terras pretas arqueológicas sob diferentes usos no município de Novo Aripuanã, AM.



A amostragem foi realizada aleatoriamente, de forma que pudesse representar cada sistema de uso do solo. Foram coletadas 120 amostras por meio de anéis volumétricos com diâmetro e altura médios de 0,0254 e 0,0635 m, respectivamente, nos quais foram coletadas 20 amostras indeformadas nas profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, totalizando 40 amostras por sistema de uso do solo. Nestes mesmos locais, foram coletadas amostras para determinação dos seguintes atributos do solo: densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), diâmetro médio ponderado (DMP), resistência do solo à penetração (RP), granulometria (areia, argila e silte), argila dispersa em água (ADA), índice de floculação (IF) e matéria orgânica do solo (MOS).

A análise granulométrica das partículas sólidas do solo foi realizada pelo método da pipeta, utilizando solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico e agitação mecânica em milk-shake de alta rotação por 10 min. A fração argila foi separada por sedimentação, a areia por tamisação e, o silte calculado por diferença (EMBRAPA, 2017).

A argila dispersa em água foi avaliada conforme Embrapa (2017), a partir da TFSA, utilizando-se agitação mecânica rápida e água destilada. O índice de floculação da argila foi calculado pela expressão  $[100 * (\text{argila total} - \text{argila dispersa em água}) / \text{argila total}]$ .

A  $D_s$  foi determinada pela relação massa de solo seco e volume do cilindro (EMBRAPA, 2017). A porosidade total foi obtida a partir da relação entre a  $D_s$  e a densidade de partículas (Equação 15). O volume de microporos foi considerado como o conteúdo volumétrico de água retido no potencial de -0,006 MPa, a macro, por sua vez, foi obtida pela diferença entre a porosidade total do solo e, o volume de microporos (EMBRAPA, 2017).

$$PT = \left( 1 - \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (15)$$

em que, PT = porosidade total;  $D_s$  = densidade do solo;  $D_p$  = densidade de partícula.

O diâmetro médio ponderado (DMP), foi determinado de acordo com o método descrito por Kemper e Chepil (1965), onde as amostras de solo coletadas nas profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m foram levadas ao peneiramento por meio do vibrador Prooutest. Os agregados que passaram pela peneira de 9,52 mm e que ficaram retidos na peneira de 4,76 mm foram utilizados no ensaio. Após serem secos ao ar, os agregados foram saturados por dez minutos e posteriormente levados ao conjunto de peneiras para o peneiramento em água por 30 minutos. Foram utilizadas cinco peneiras com os diâmetros de 4,76, 2,0, 1,0, 0,5 e 0,25 mm, para obtenção das seguintes classes de agregados  $C_1$  (9,52-4,76 mm),  $C_2$  (4,76-2,0 mm),  $C_3$  (2,0-1,0 mm),  $C_4$  (1,0-0,5 mm),  $C_5$  (0,5-0,25 mm) e  $C_6$  (< 0,25 mm).

A resistência do solo à penetração foi determinada em laboratório, em três pontos para cada amostra, utilizando-se um penetrômetro eletrônico marca Marconi, modelo MA-933, com velocidade de deslocamento constante de  $1,0 \text{ cm min}^{-1}$ , equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4,0 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de  $30^\circ$ , receptor e interface acoplado a um computador, para registro das leituras por meio de um *software* próprio do equipamento.

O teor de matéria orgânica por sua vez, foi calculado por diferença, com base no carbono orgânico (Equação 16):

$$MO = 1,724 \times CO \quad (16)$$

em que, MO = matéria orgânica do solo; CO = teor de carbono orgânico total na camada amostrada ( $\text{g kg}^{-1}$ )

Para a elaboração dos modelos de compressibilidade nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, foram utilizadas 20 amostras indeformadas de estrutura preservada em cada camada, coletadas em floresta natural. Os corpos de prova foram saturados e, em seguida tiveram as umidades equilibradas em laboratório à temperatura ambiente, para obtenção de

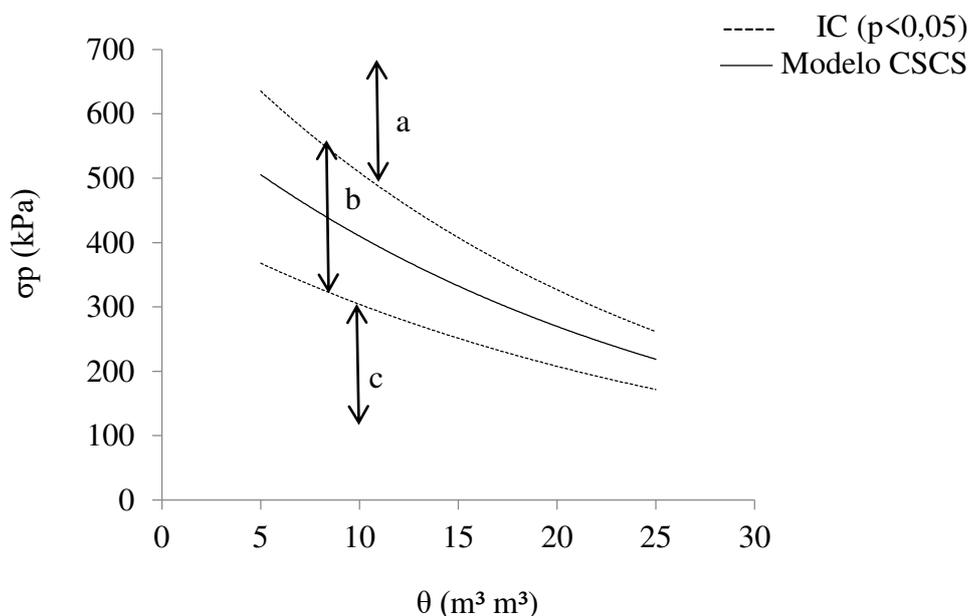
amostras na faixa de umidade com variação de solo seco a saturado, ou seja, cinco teores de umidade para cada camada.

Para as camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m foram utilizadas as umidades de (0,05, 0,13, 0,21, 0,29 e 0,31  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e (0,05, 0,11, 0,16, 0,22 e 0,27  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), respectivamente. Na camada de 0,00-0,10 m, as umidades utilizadas para alta e baixa umidade para o feijão guandu foram (0,06 e 0,26  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e pastagem (0,09 e 0,25  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ). Já na camada de 0,10-0,20 m, as umidades para alta e baixa umidade foram (0,08 e 0,24  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e (0,11 e 0,25  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), para o feijão guandu e pastagem, respectivamente. Essas umidades foram utilizadas com a finalidade de se avaliar o solo em períodos mais úmidos e mais secos.

O método de Dias Júnior *et al.* (2005) foi utilizado para verificar o impacto dos usos no solo (Figura 19). Este método consiste na divisão desses modelos em três “regiões” Os corpos de provas na região “a” indicam que há compactação adicional; na região “b”, que não ocorreu compactação adicional do solo, mas há tendência que venha a ocorrer se não for levado em consideração a capacidade de suporte de carga do solo; região “c”, ausência de compactação do solo.

As amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial em um consolidômetro automatizado com interação homem máquina (IHM), modelo CNTA-IHM/BR-001/07, Silva *et al.* (2015), fabricado pela Masquetto Automação & Equipamentos. Os níveis de pressão aplicados ao corpo de prova foram de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, observando-se a pressuposição de Taylor (1948), que define a deformação máxima de até 90% do corpo de prova, para cada nível de pressão. Esta operação foi determinada automaticamente pelo equipamento, previamente configurado pelo usuário, o qual permite programação do tempo, níveis de pressão e a deformação máxima a ser alcançada pelo corpo de prova.

Figura 19 - Modelo de capacidade de suporte de carga do solo (CSCS), o qual apresenta três diferentes “regiões” (a), (b) e (c) relacionadas a compactação. Região “a” = com compactação; “b” = sem compactação, porém com tendência a compactar; e “c” = sem compactação. Adaptado de Dias Júnior *et al.* (2005).



A partir da curva de compressão, foi estimado o índice de compressão ( $m$ ) e  $\sigma_p$ , observando a sugestão dos métodos M1 (quando a sucção for menor ou igual a 100 kPa) e M3 (quando a sucção for maior que 100 kPa), propostos por Dias Júnior e Pierce (1995).

Para a elaboração dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo, os valores de  $\sigma_p$  foram plotados em função da umidade volumétrica ( $\theta$ ) a que cada corpo de prova foi submetido e, posteriormente, ajustada ao modelo (Equação 17), proposto por Dias Júnior (1994). A partir desse modelo foi possível prever a pressão máxima que o solo pode suportar em função da umidade, sem que o mesmo apresente compactação adicional.

$$\sigma_p = 10^{(a + bU)} \quad (17)$$

em que,  $\sigma_p$  = pressão de preconsolidação (kPa);  $U$  = umidade gravimétrica ( $\text{kg kg}^{-1}$ );  $a$  e  $b$  = parâmetros de ajuste.

O ajuste e construção dos gráficos dos modelos de capacidade de suporte de carga foram realizadas por meio do *software* Sigma Plot 11.0, obtendo-se os parâmetros "a" e "b" (intercepto e ângulo de inclinação da reta, respectivamente), os quais possibilitaram estimar as pressões de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) para cada condição desse estudo. As comparações entre as

equações obtidas de cada modelo das distintas concisões deste estudo, foram realizadas pelo procedimento descrito em Snedecor e Cocharam (1989).

A análise de variância (ANOVA) foram realizados por meio do software SigmaPlot versão 11.0. Quando os resultados foram significativos, aplicou-se o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) para comparação entre as médias.

### 4.3 RESULTADOS

A caracterização do solo para os diferentes sistemas de uso encontra-se na Tabela 12. Os atributos DMP, Ds, micro e RP apresentaram comportamento semelhante entre si, onde a pastagem apresentou valores superiores aos demais sistemas de uso do solo. Porém, para o atributo macro, houve um comportamento inverso, no qual a pastagem apresentou valores inferiores aos demais tratamentos, tanto na camada de 0,00-0,10 m como 0,10-0,20 m.

Quanto à textura do solo, a argila e silte apresentaram tendência de aumento em profundidade para os usos de feijão guandu e pastagem, ao contrário da floresta natural que apresentou ligeira redução entre as camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m (Tabela 12). A areia total aumentou em profundidade para todos os sistemas de uso do solo.

No que diz respeito à ADA, para camada de 0,00-0,10 m a floresta natural teve o maior valor para esse atributo ( $78 \text{ g kg}^{-1}$ ), enquanto o uso de feijão guandu e pastagem proporcionaram valores semelhantes entre si. Para a camada de 0,10-0,20 m, a floresta natural também apresentou maior valor de ADA que os demais sistemas de uso do solo ( $78 \text{ g kg}^{-1}$ ), seguida pelo feijão guandu a pastagem, com 69 e  $65 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente.

Verificou-se para a floresta natural o maior valor para o atributo IF na camada superficial (30%), quando comparado a camada de 0,10-0,20 m (11%). Por outro lado, o feijão guandu e a pastagem apresentaram valores iguais (29%) em ambas as camadas (Tabela 12).

Tabela 12 - Caracterização do solo nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m em Terras Pretas Arqueológicas, considerando diferentes sistemas de uso do solo no município de Novo Aripuanã-AM.

Atributos	Sistemas de uso do solo		
	Floresta Natural	Feijão Guandu	Pastagem
0,00-0,10 m			
Ds	1,21	1,25	1,31
DMP	2,88	2,80	2,88
RP	0,96	1,25	1,40
Macro	0,28	0,25	0,19
Micro	0,29	0,29	0,33
Areia Total	701,22	750,61	743,29
Silte	199,64	170,06	177,10
Argila	99,13	79,33	79,60
ADA	69	58	58
IF	30	27	27
MOS	38,46	44,00	38,00
0,10-0,20 m			
Ds	1,30	1,29	1,40
DMP	1,98	2,02	2,24
RP	1,24	1,38	1,49
Macro	0,25	0,24	0,19
Micro	0,28	0,29	0,31
Areia Total	718,74	764,95	762,22
Silte	194,02	137,64	146,61
Argila	87,24	97,41	91,17
ADA	78	69	65
IF	11	29	29
MOS	33,00	32,00	31,00

Ds = densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ); DMP = diâmetro médio ponderado (mm); RP = resistência do solo à penetração (MPa); Macro = macroporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ); Micro = microporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ); Areia Total, Silte e Argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ); ADA = argila dispersa em água ( $\text{g kg}^{-1}$ ); IF = índice de floculação (%); MOS = matéria orgânica do solo ( $\text{g kg}^{-1}$ ).

O uso do feijão guandu na camada de 0,00-0,10 m proporcionou maior teor de MOS,  $44,00 \text{ g kg}^{-1}$ , enquanto que a floresta natural e pastagem apresentaram valores similares para esse atributo, sendo da ordem de  $38,46$  e  $38,00 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente (Tabela 12). Para todos os sistemas de uso, a camada de 0,10-0,20 m apresentou teor de MOS inferior à camada superficial e com valores próximos entre si, correspondendo a  $33 \text{ g kg}^{-1}$  para floresta natural,  $32,00 \text{ g kg}^{-1}$  para o feijão guandu e  $31,00 \text{ g kg}^{-1}$  para pastagem. Verificou estreita relação entre o teor de MOS e os atributos Ds e DMP, sendo que na camada superficial encontram-se os maiores de valores de MOS e DMP e menores de Ds, ocorrendo comportamento oposto para camada de 0,10-0,20 m.

De modo geral, ao analisar os atributos ADA, MOS e IF conjuntamente, observa-se que a floresta natural, apresentou os maiores valores de ADA e menores de MOS e IF para a camada de 0,00-0,10 m. O mesmo comportamento foi observado para o feijão guandu e pastagem, exceto para o IF, pois na camada de 0,10-0,20 m elevou-se a ADA para todos os usos, o IF evidenciou um ligeiro aumento para o feijão guandu e pastagem e, redução para a floresta natural, com decréscimo do teor de MOS em todos os usos.

O teste de significância entre os modelos de CSCS das camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m para floresta natural foram significativos, assim como os coeficientes angular e linear (Tabela 13).

Tabela 13 - Teste de significância, segundo Snedecor & Cochran (1989), entre os modelos de capacidade de suporte de carga de terra preta arqueológica sob floresta natural em diferentes camadas.

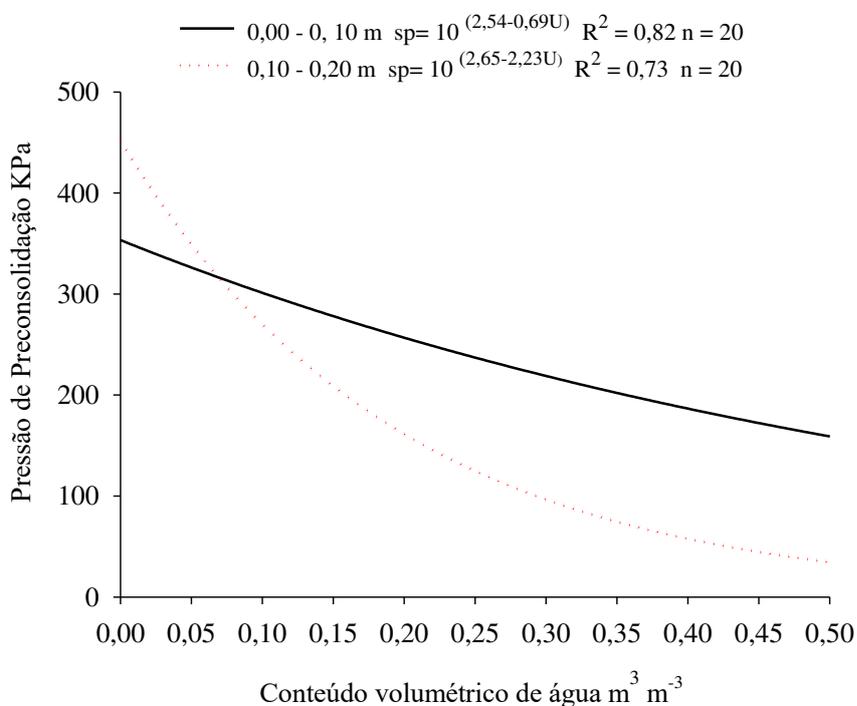
TPA sob Floresta	F	Coeficiente angular b	Coeficiente linear a
0,00-0,10 vs. 0,10-0,20 m	**	**	**

\*\* significativo a 1% de probabilidade.

Os coeficientes angulares e lineares variaram entre 2,54 e 2,65 e -0,69 e -2,23, para as camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente (Figura 20). Seguindo esta mesma ordem, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram de 0,82 e 0,73. Destaca-se ainda que, a camada de 0,00-0,10 m apresentou valores de pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) menores que a camada de 0,10-0,20 m para conteúdo de água menores que  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , com conteúdo de água superior a  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , a camada de 0,10-0,20 m apresentou menor capacidade de suporte de carga.

Os modelos de capacidade de suporte de carga para os usos de pastagem e feijão guandu, nas camadas de 0,00-0,10 (A e B) e 0,10-0,20 m (C e D), em dois cenários distintos, solo seco (baixa umidade) e solo úmido (alta umidade), são apresentados na Figura 21. Observa-se que o modelo gerado para a camada superficial, 0,00-0,10 m, apresenta uma pequena amplitude entre os valores de  $\sigma_p$ , quando comparado à camada de 0,10-0,20 m.

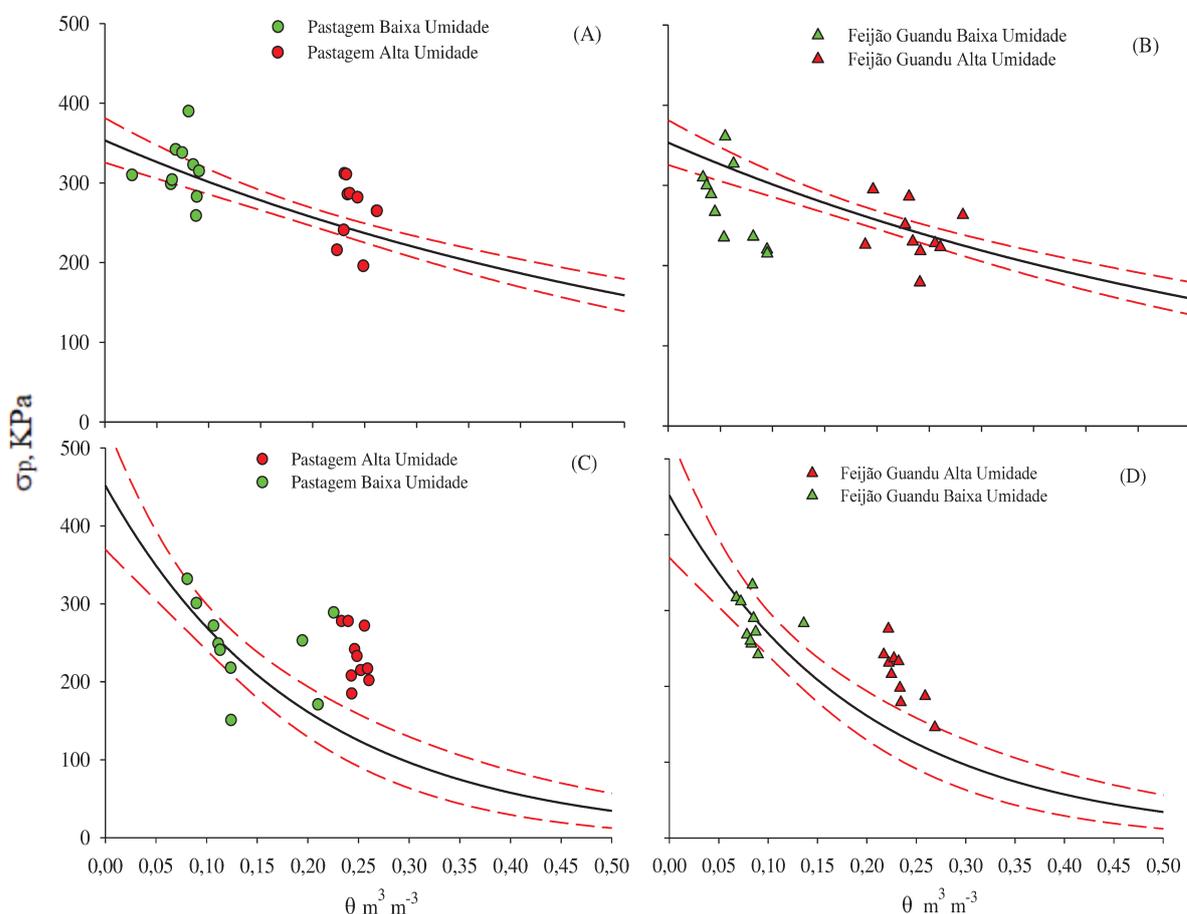
Figura 20 - Modelos de capacidade de suporte de carga para Terra Preta Arqueológica, todos sob floresta natural nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, no município de Novo Aripuanã-AM.



Para o uso de pastagem, em uma condição de baixa umidade, 30% das amostras apresentaram compactação adicional (região “a” Figura 21A) e, 30% apresentam tendência a compactação caso os valores de CSCS sejam excedidos (região “b” Figura 21A), antagonicamente 40% das amostras não sofreram compactação (região “c” Figura 21A). Por outro lado, em uma condição de alta umidade, houve maior tendência a compactação do solo, uma vez que, 70% das amostras demonstraram compactação adicional (região “a” Figura 21A), 10% apresentaram tendência a compactação, caso a CSCS não seja respeitada (região “b” Figura 21A) e, 20% não sofreram compactação (região “c” Figura 21A).

Em contrapartida, para o uso do feijão guandu, em condições de baixa umidade, observa-se poucos indícios de compactação do solo, uma vez que, 70% das amostras apresentaram ausência de compactação (região “c” 21B), enquanto, amostras compactadas e com tendência a compactação, englobadas pelas regiões “a” e “b” do modelo, foram minoria, correspondendo a 10% cada. Em altos teores de umidade, 40% das amostras não sofreram compactação adicional (região “c” 21B), 30% apresentam tendência a sofrer compactação (regiões “b” 21B) e 30% sofreram compactação (regiões “a” 21B).

Figura 21 - Modelos de capacidade de suporte de carga para pastagem e feijão guandu cultivados em solos antropogênicos, tendo como referência a floresta natural nas camadas de 0,00-0,10 (A e B) e 0,10-0,20 m (C e D), no município de Novo Aripuanã-AM.



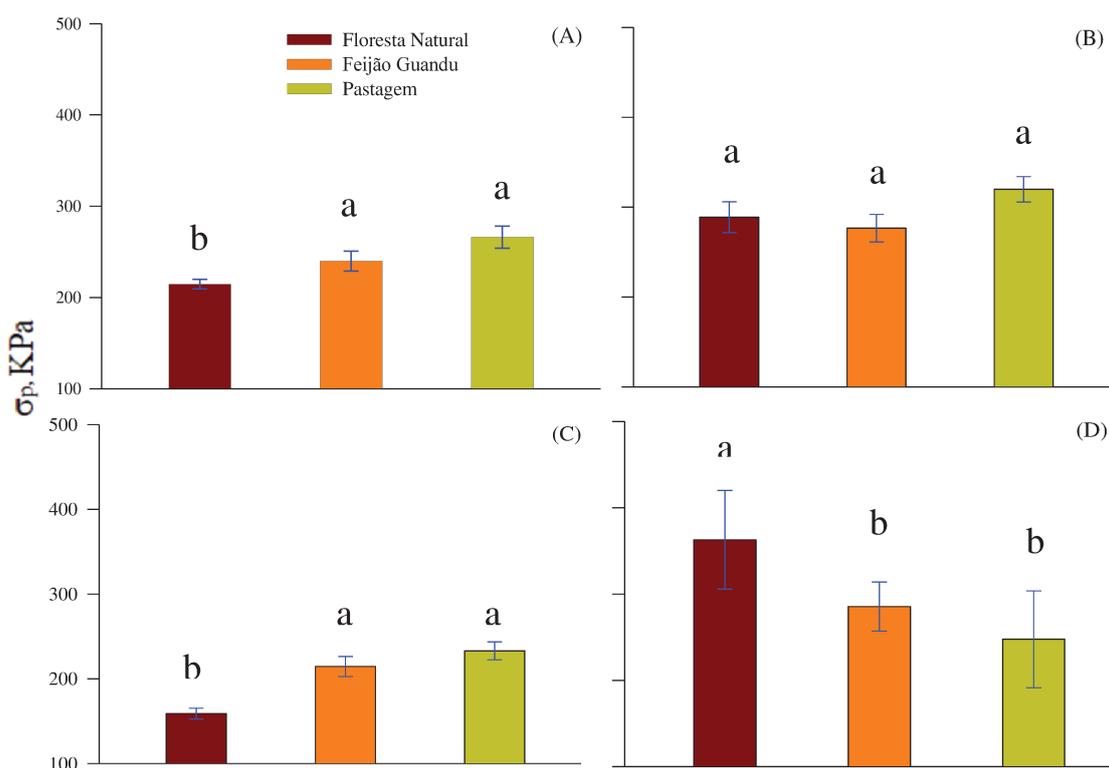
Para a camada de 0,10-0,20 m em uma condição de solo seco (baixa umidade), para pastagem não ocorreu compactação do solo, apenas tendência à compactação (região “b”) e ausência de compactação (região “c” Figura 21C). Porém, em uma condição de alta umidade, 100% das amostras sofreram compactação adicional, estando todas concentradas na região “a” do modelo (Figura 21C). Para o feijão guandu, em uma condição de solo seco, houve maior concentração de amostras na região “b” e “c” do modelo, no qual corresponderam a 40% cada, somado a 20% de amostras que sofreram compactação adicional (região “a” Figura 21C). Para uma condição de alta umidade no solo, 90% das amostras indicaram compactação adicional (região “a” Figura 21C) e 10% apresentaram tendência a compactação (região “b” Figura 21C).

A análise da Figura 22 permite avaliar os valores de CSCS obtidos por cada sistema de uso, em condições de alta e baixa umidade do solo, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m. Para camada de 0,00-0,10 m, em uma condição de alta umidade do solo, a floresta natural apresentou valores de CSCS significativamente inferiores a área de pastagem, enquanto que o

feijão guandu apresentou valores semelhantes tanto na floresta natural como na pastagem (Figura 22A). Entretanto, em baixa umidade, ou seja, solo seco, não houve diferença entre os valores de CSCS apresentados pela floresta natural, feijão guandu e pastagem (Figura 22B).

Para a camada de 0,10-0,20 m, tanto em alta como em baixa umidade, os sistemas de uso do solo se diferenciaram significativamente quanto aos valores CSCS, onde em alta umidade, o uso de pastagem e feijão guandu apresentaram valores semelhantes entre si, e superiores a floresta natural (Figura 22C) e, em condições de baixa umidade, a floresta apresentou maiores valores de CSCS que a pastagem e feijão guandu, que por sua vez foram iguais entre si (Figura 22D).

Figura 22 - Capacidade de suporte de carga em Terra Preta Arqueológica sob diferentes usos na camada de 0,00-0,10 m em condições de alta (A) e baixa umidade (B) e na camada de 0,10-0,20 m em condições de alta (C) e baixa umidade (D). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.



#### 4.4 DISCUSSÃO

Os valores da  $D_s$  e micro para a pastagem foram superiores a floresta natural e o feijão guandu, em ambas as camadas estudadas. Provavelmente, estes resultados estão associados à pressão exercida no solo pelo pisoteio animal, que contribuirá para um aumento do estado de compactação do solo, em que maiores valores de  $D_s$  favoreceram os maiores

valores de micro. Somado a isso, ocorreu uma redução da MOS em profundidade, o que está de acordo com os resultados encontrados. Entretanto, apesar da pastagem ter apresentando valores mais elevados de  $D_s$ , o valor de  $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$  descrito por Silva *et al.* (2015), como crítico não foi superado.

Esta mesma relação também pode ser observada para a RP, a qual apresentou maiores valores para pastagem quando comparada a floresta natural. Comumente, os solos de TPAs apresentam elevados valores de RP devido a presença de fragmentos cerâmicos. Porém, neste estudo, nenhum sistema de uso do solo apresentou valores de RP acima de  $2,0 \text{ MPa}$ , considerado por Tavares Filho e Tessier (2009) como valor máximo, acima do qual pode vir a prejudicar o desenvolvimento das raízes das plantas.

Para a camada  $0,00-0,10 \text{ m}$ , verificou-se valores similares de DMP para floresta natural, pastagem e feijão. Na camada de  $0,10-0,20 \text{ m}$ , a pastagem foi superior ao feijão guandu e floresta natural. Resultados semelhantes foram encontrados em pesquisa com diferentes sistemas de uso do solo realizada em solos antropogênicos. Por exemplo, Gomes *et al.* (2017) encontraram maior DMP em pastagem em relação aos usos de cacau e café, este mesmo resultado foi observado por Brito *et al.* (2018), com maior DMP para ambiente de pastagem em TPAs. O DMP de agregados revela que a pastagem afeta a agregação do solo, segundo Conte *et al.* (2011), a presença dos animais pode contribuir para a estabilização de agregados pelo efeito do pisoteio, ao promover a aproximação de partículas minerais. No entanto, Carpenelo e Mielniczuk (1990), relatam que o aumento do DMP em áreas sob pastejo não é um indicador de melhoria no estado de agregação do solo, pois solos compactados podem apresentar elevada estabilidade de agregados em água.

Os valores elevados de macro foram constatados no uso sob floresta natural, seguido do feijão guandu e pastagem em ambas as camadas. Ao analisar em conjunto as variáveis  $D_s$ , RP e micro, observou-se uma relação inversa destas com a macro, pois onde há os maiores valores desses atributos, ocorre os menores para macro e vice-versa. Salienta-se ainda que todos os sistemas de uso revelaram valores acima do limite mínimo do  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , segundo Bertol *et al.* (2004), este valor seria limitante para desenvolvimento radicular das plantas, percolação de água e trocas gasosas. Ao realizar a caracterização física de três sítios arqueológicos: 1- sob floresta secundária com 30 anos, 2- sob floresta secundária com 25 anos, 3- floresta secundária e, floresta secundária com 15 anos, Barros *et al.* (2016), verificaram valores de macro  $0,18$ ,  $0,13$ ,  $0,15$  e  $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente, corroborando com os resultados obtidos neste estudo.

A fração areia foi superior ao silte e argila para todos os usos, tanto na camada de  $0,00-0,10$  quanto na camada de  $0,10-0,20 \text{ m}$ . Na camada de  $0,10-0,20 \text{ m}$ , a floresta natural

mostrou redução da argila, por outro lado, este atributo aumentou para o uso com o feijão guandu e pastagem e, o silte revelou uma pequena redução. Em TPAs, Smith (1980) relata que os elevados valores de areia é uma de suas principais particularidades. Teixeira *et al.* (2009) justificam que isto é devido à formação de material organomineral estável de tamanho equivalente à areia, oriundo da junção de prática do uso do fogo e material orgânico depositado pelos assentamentos indígenas que habitaram esses locais.

Quanto ao índice de floculação na camada de 0,00-0,10 m, o uso sob floresta natural foi o que apresentou maior IF% em comparação ao feijão guandu e a pastagem. Na camada de 0,10-0,20 m ocorreu o inverso, com feijão guandu e pastagem sendo superior a floresta natural. Possivelmente esses resultados são reflexo do menor aporte de material orgânico em camadas mais profundas em relação a camada superficial, onde há decomposição de resíduos vegetais e, conseqüentemente elevado acúmulo de MOS.

Independente do sistema de uso do solo, verificou maior concentração da MOS na camada de 0,00-0,10 em comparação a camada de 0,10-0,20 m. Dessa forma, é possível observar a influência da MOS sobre outros atributos do solo, tais como a Ds, onde o feijão guandu apresentou maior MOS na camada superficial e, em consequência revelou a menor Ds. Por outro lado, a pastagem, que apresentou menor teor de MOS na camada superficial revelou o maior Ds. Na camada de 0,10-0,20 m, observou redução do teor de MOS em todos os sistemas de uso do solo e, conseqüentemente maiores valores de Ds são evidenciados.

Ao considerar os procedimentos propostos por Snedecor e Cochran (1989) para comparação de modelos, houve diferença entre as camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, ou seja, os modelos indicaram comportamento diferentes em relação à CSCS. Para condições de baixa umidade, a camada de 0,10-0,20 m apresentou os valores de CSCS que a camada superficial, entretanto, em condições de alta umidade, a camada de 0,00-0,10 m evidenciou maior CSCS. Provavelmente, esses resultados ocorreram em virtude da maior Ds, micro e ADA para a camada de 0,10-0,20 m. Segundo Lambe e Whitman (1979) a maior Ds promove a proximidade entre as partículas, favorecendo o desenvolvimento da coesão quando solo está com baixo teor de água. Com aumento da Ds ocorre uma maior capacidade de suporte de carga, na camada de 0,00-0,10 m evidenciou maior CSCS em condições de alta umidade, devido ao teor de matéria orgânica, IF (%) e argila.

Dentre os três usos na camada de 0,00-0,10 m com alta umidade, a pastagem revelou maior CSCS, sendo estatisticamente igual ao feijão guandu e, diferente da floresta natural. Provavelmente, a elevada CSCS na pastagem, é decorrente da influência do pisoteio animal. Iori *et al.* (2012) em estudo com áreas de pastagem e mata nativa, verificou que para

alta umidade, a pastagem mostrou maior CSCS que a mata e, atribuiu isto, ao pisoteio animal. A CSCS em condições de baixa umidade para todos os usos foi igual, pois não houve diferença estatística entre os usos. Isto pode ser atribuído aos valores elevados e próximos de IF% e aos altos teores de MOS, cujo teor pode ser suficiente para estabelecer um efeito cimentante entre os grãos de areia, evidenciando maior coesão para esta condição de umidade.

Ao comparar as médias de cada uso em condições de alta umidade na camada de 0,10-0,20 m, observou-se que a pastagem e o feijão guandu foram iguais e com maior CSCS do que a floresta natural. O pisoteio animal, segundo Proffit *et al.* (1993) pode exercer uma pressão de 350 a 400 kPa. Em complemento, Nie *et al.* (2001) relatam que essas pressões chegam a ser multiplicada quando os animais se movimentam. De acordo com Willatt e Pullar (1983), a pressão dos animais sobre solo, é devido a maior concentração do seu peso em uma área pequena, o casco.

Em baixa umidade ocorreu o inverso, com maior CSCS para a floresta natural e menor para pastagem e feijão guandu. Este fato pode ser justificado pelos elevados valores de ADA em floresta natural, uma vez que este atributo contribui para maior adensamento por meio do preenchimento de poros com argila aluvial nesta camada. Além disso, a floresta natural revelou o maior teor de silte e menor de areia em relação ao feijão guandu e a pastagem. Possivelmente, os teores de argila e MOS da pastagem e feijão guandu, não foram suficientes para obter uma coesão entre as partículas de areia para esta condição de baixa umidade.

#### 4.5 CONCLUSÕES

O teor de matéria de orgânica na camada superficial aliviou a pressão de preconsolidação em terra preta arqueológica sob usos de pastagem e feijão guandu.

Com redução da coesão devido ao aumento do conteúdo de água, a floresta natural nas duas camadas analisadas, revelou ser mais suscetível ao processo compressivo que os usos de pastagem e feijão guandu.

#### 4.6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V.; RODRIGUES, S.; KERN, D. C. Distribuição da porosidade textural e estrutural em solos de terra preta arqueológica. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.47, n.4, p.609-615, 2016.

BERTOL, I.; GUADAGNIN, J. C.; CASOL, P. C.; AMARAL, A. J.; BARBOSA, F. T. Perdas de fósforo e potássio por erosão hídrica em um Inceptisol sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.485-494, 2004.

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

BRAZACA, S. G. C.; SALGADO, J. M.; MANCINI FILHO, J.; NOVAES, N. J. Avaliação física, química, bioquímica e agrônômica de cultivares de feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L) Mill). **Alimentos e Nutrição**, v.7, n.1, p.37-45, 1996.

BRITO, W. B. M.; CAMPOS, M. C. C.; MANTOVANELLI, B. C.; CUNHA, J. M.; FRANCISCON, U.; SOARES, M. D. R. Spatial variability of soil physical properties in archeological dark earths under different uses in southern Amazon. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.182, p.103-111, 2018.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.14, n.1, p.99-105, 1990.

CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; LEVIEN, R.; WESP, C. L. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.10, p.1301-1309, 2011.

CPRM. Centro de Pesquisa de Recursos Minerais. **Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens**. Manaus, 2001. 93p. (Relatório Técnico).

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, E. P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAÚJO-JÚNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, n.62, n.3, p.248-255, 2005.

DIAS JÚNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Tese (Tese de Doutorado) – Michigan State University, East Lansing, 1994.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curve. **Soil Technology**, Amsterdam, v.8, n.2, p.139-151, 1995.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.2, p.175-182, 1996.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos**. 3ª edição revista e ampliada, Brasília: Embrapa, 573p. 2017.

GERMANO, M. G.; CANNAVAN, F. S.; MENDES, L. W.; LIMA, A. B.; TEIXEIRA, W. G.; PELLIZARI, V. H.; TSAI, S. M. Functional diversity of bacterial genes associated with aromatic hydrocarbon degradation in anthropogenic dark earth of Amazonia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.5, p.654-664, 2012.

GLASER. B.; BIRK, J. J. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (Terra Preta de Índio). **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Amsterdam, v.82, n.1, p.39-51, 2012.

GOMES, R. P.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; SILVA, D. M. P.; CUNHA, J. M.; FRANCISCON, U.; SILVA, L. S.; OLIVEIRA, I. A.; BRITO, W. B. M. Spatial variability of aggregates and organic carbon under three different uses of Indian Black Earth in Southern Amazonas. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.33, n.6, p.1513-1522, 2017.

IORI, P.; SILVA, R. B.; DIAS JÚNIOR, M. S.; LIMA, J. M. Pressão de preconsoidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.5, p.1448-1456, 2012.

KAWA, N.C.; MICHELANGELI, J.A.C.; CLEMENT, C.R. Household Agrobiodiversity Management on Amazonian Dark Earths, Oxisols, and Floodplain Soils on the Lower Madeira River, Brazil. **Human Ecology**, New York, v.43, n.2, p.339-353, 2015.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, 1965. p.499-510.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics, SI version**. New York: John Wiley, 1979. 553p.

MACEDO, R. S.; TEIXEIRA, W. G.; CORRÊA, M. M.; MARTINS, G. C.; VIDAL-TORRADO, P. Pedogenetic processes in anthrosols with pretic horizon (Amazonian Dark Earth) in Central Amazon, Brazil. **Plos One**, v.12, n.5, p.1-19, 2017.

MOLINE, E. F. V.; COUTINHO, E. L. M. Atributos químicos de solos da Amazônia Ocidental após sucessão da mata nativa em áreas de cultivo. **Revista Ciência Agrária/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v.58, n.1, p.14-20, 2015.

NIE, Z. N.; WARD, G. N.; MICHAEL, A. T. Impact of pugging by dairy cows on pastures and indicators of pugging damage to pasture soil on South – western Victoria. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.52, n.1, p.37-43, 2001.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; FREITAS, L.; AQUINO, R. E.; CUNHA, J. M.; SOARES, M. D. R.; SILVA, L. S.; FONSECA, J. S.; SILVA, D. M. P.; SOUZA, Z. M.; SOUZA, F. G. Carbon stock variability and aggregate stability in soil of Amazon, Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, v.12, n.6, p.922-930, 2018.

PROFFITT, A.P.B.; BENDOTTI, S.; HOWELL, M.R.; EASTHAM, J. The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a Red – Brown earth. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.44, n.2, p.317-331, 1993.

RAYOL, B.P.; ALVINO-RAYOL, F. O. Uso de feijão guandú (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) para adubação verde e manejo agroecológico de plantas espontâneas em reflorestamento no estado do Pará. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Porto Alegre, n.7, v.1, p.104-110, 2012.

SILVA, A. H.; FAVARETTO, N.; CAVALIERI, K. M. V.; DIECKOW, J.; VEZZANI, F. M.; PARRON, L. M.; CHEROBIM, V. F.; MARIOTI, J. FERRARI NETO, H. Atributos físicos do solo e escoamento superficial como indicadores de serviços ambientais. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G. PRADO, B. **Serviços ambientais em sistemas agrícola e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília: Embrapa, 2015. p.71-83.

SILVA, R. B.; MASQUETTO, B. J.; LANÇAS, K. P.; SILVA, F. A. M. Desenvolvimento, automação e desempenho de um consolidômetro com interface homem-máquina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, n.2, p.416-427, 2015.

SMITH, N. J. H. Anthrosols and human carrying capacity in Amazonia. **Annals of the Association of American Geographers**, v.70, n.4, p.553-566, 1980.

SMITH, P.; HOUSE, J. I.; BUSTAMANTE, M.; SOBOCKA, J.; HARPER, R.; PAN, G.; WEST, P. C.; CLARK, J.M.; ADHYA, T.; RUMPEL, C.; PAUSTIAN, K.; KUIKMAN, P.; COTRUFO, M. F.; ELLIOTT, J. A.; MCDOWELL, R.; GRIFFITHS, R. I.; ASAKAWA, S.; BONDEAU, A.; JAIN, A. K.; MEERSMANS, J.; PUGH, T. S. A. M. Global change pressures on soils from land use and management. **Global Change Biology**, v.22, n.3, p.1008-1028, 2016.

SNEDECOR, G. W.; COCHARAN, W. G. **Statistical methods**. 8. Ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503p.

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M.; BRITO, W. B. M.; FRANCISCON, U.; CASTIONI, G. A. F. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista Ciência Agrária/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v.58, n.4, p.434-441, 2015.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Compressibility of oxisol aggregates under no-till in response to soil water potential. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.6, p.1525-1533, 2009.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: J. Wiley, 1948. 700p.

TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C.; MACEDO, R. S.; NEVES JUNIOR, A. F.; MOREIRA, A.; BENITES, V. M.; STEINER, C. As propriedades físicas e hídricas dos Horizontes Antrópicos das Terras Pretas de Índio na Amazônia Central. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 242-250.

TISDALL J. M.; OADES J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **European Journal of Soil Science**, v.33, n.2, p.141-163, 1982.

WILLATT, S.T.; PULLAR, D.M. Changes in soil physical properties under grazes pastures. **Australian Journal of Soil Research**, v.22, n.3, p.343-348, 1983.

## 5.1 CONCLUSÃO GERAL

A qualidade física do solo sob pastagem, foi menor em relação ao feijão gunadu e floresta natural, isso teve como consequência uma restrição no conteúdo de água. Por outro lado, o uso sob feijão guandu destacou-se quanto a estrutura do solo.

O uso do feijão guandu em terras pretas de índio potencializa a fertilidade desses solos. A maior variação especial foi constatado para os usos do solo sob pastagem e floresta natural nas camadas superficiais e menor para floresta natural na última camada.

A elevada fertilidade dos solos antropogênicos sob usos de pastagem e feijão guandu, promoveu a diminuição da pressão de preconsoidação. O aumento de água revelou que a floresta natural é mais passível ao processo compressivo que a pastagem e o feijão guandu.

## 5.2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA GERAL

ALVINO-RAYOL, F. O.; ROSA, L. S.; RAYOL, B. P. Efeito do espaçamento e do uso de leguminosas de cobertura no manejo de plantas invasoras em reflorestamento de *schizolobium amazonicum* huber ex. ducke (paricá). **Revista Árvore**, Viçosa, v.35, n.3, p.391-399, 2011.

AQUINO, R. E.; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; SIQUEIRA, D. S. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.44, n.1, p.32-41, 2014.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impacto da conversão floresta-pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta Amazônica**, Manaus, v.41, n.1, p.103-114, 2011.

BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V.; CANELLAS, L. P.; KERN, D. C. Fracionamento químico da matéria orgânica e caracterização física de Terra Preta de Índio. **Revista Ciência Agrária/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v.55, n.1, p.44-51, 2012.

BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V.; RODRIGUES, S.; KERN, D. C. Distribuição da porosidade textural e estrutural em solos de terra preta arqueológica. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.47, n.4, p.609-615, 2016.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.3, p.555-560, 2001.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.36, n.3, p.971-982, 2012.

BRAZACA, S. G. C.; SALGADO, J. M.; MANCINI FILHO, J.; NOVAES, N. J. Avaliação física, química, bioquímica e agrônômica de cultivares de feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L) Mill). **Alimentos e Nutrição**, Araraquara, v.7, n.1, p.37-45, 1996.

BRITO, W. B. M.; CAMPOS, M. C. C.; MANTOVANELLI, B. C.; CUNHA, J. M.; FRANCISCON, U.; SOARES, M. D. R. Spatial variability of soil physical properties in archeological dark earths under different uses in southern Amazon. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.182, p.103-111, 2018.

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

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.14, n.1, p.99-105, 1990.

CHAGAS, L. F. B.; FALCÃO, N. P. S.; PADILHA, F. J.; OLIVEIRA, D. M.; GUIMARÃES, R. S.; CAMPOS, D. V. B.; MALVERDE, E. M.; FERREIRA, P. H. Z.; SOARES, R. Avaliação

do impacto do cultivo de citros sobre os Estoques de carbono e Nitrogênio das frações leves da matéria orgânica de solos antrópicos (Terras Pretas de Índio) e solos adjacentes (Latosolos) da Amazônia Central. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v.9, n.5, p.2067-2081, 2017.

CUNHA, J. M.; GAIO, D. C.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; SILVA, D. M. P.; LIMA, A. F. L. Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica da Amazônia. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v.12, n.2, p.263-281, 2017.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.1, p.199-238, 1988.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, E. P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAÚJO-JÚNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, n.62, n.3, p.248-255, 2005.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.2, p.175-182, 1996.

DIAS JÚNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Tese (Tese de Doutorado) – Michigan State University, East Lansing, 1994.

FALCÃO, N. P. S.; BROGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (*Carica papaya L.*). **Acta Amazônica**, Manaus, v.36, n.4, p.401-406, 2006.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um Latossolo Roxo**. 1993. 138 f. Dissertação (Universidade Estadual de Campinas) Campinas.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; BLAINSKI, E.; FIDALSKI, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.6, p.1512-1521, 2013.

HAISE, H.R.; HAAS, H.J.; JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity to 1/3-atmosphere percentage and “minimum point” as related to 15-26 atmosphere percentage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.34, n.1, p.20-25, 1955.

KAWA, N.C.; MICHELANGELI, J.A.C.; CLEMENT, C.R. Household Agrobiodiversity Management on Amazonian Dark Earths, Oxisols, and Floodplain Soils on the Lower Madeira River, Brazil. **Human Ecology**, New York, v.43, n.2, p.339-353, 2015.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, 1965. p.499-510.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.857-867, 2002.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics, SI version**. New York: John Wiley, 1979. 553p.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.88, n.1-2, p.279-285, 2006.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, Madison, v.1, p.277-294, 1985.

MACEDO, R. S.; TEIXEIRA, W. G.; CORRÊA, M. M.; MARTINS, G. C.; VIDAL-TORRADO, P. Pedogenetic processes in anthrosols with pretic horizon (Amazonian Dark Earth) in Central Amazon, Brazil. **Plos One**, v.12, n.5, p.1-19, 2017.

MARQUES, J. D. O.; LUIZÃO, F. J.; TEIXEIRA, W. G.; SARRAZIN, M.; FERREIRA, S. J. F.; BELDINI, T. P.; MARQUES, E. M. A. Distribution of organic carbon in different soil fractions in ecosystems of central Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, n.1, p.232-242, 2015.

MATIAS, S. S. R.; BORBA, J. A.; TICELLI, M.; PANOSSO, A. R.; CAMARA, F. T. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes usos. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.40, n.3, p.331-338, 2009.

MOLINE, E. F. V.; COUTINHO, E. L. M. Atributos químicos de solos da Amazônia Ocidental após sucessão da mata nativa em áreas de cultivo. **Revista Ciência Agrária/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v.58, n.1, p.14-20, 2015.

MOREIRA, A. Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia Ocidental. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.2, p.307-315, 2007.

MOREIRA, F. R.; DECHEN, S. C. F.; SILVA, A. P. S.; FIGUEIREDO, G. C.; MARIA, I. C.; PESSONI, P. T. Intervalo Hídrico Ótimo em um Latossolo Vermelho cultivado em sistema semeadura direta por 25 anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.1, p.118-127, 2014.

MOREIRA, V.F.; PEREIRA, A. J.; GUERRA, J. G. M.; GUEDES, R. E.; COSTA, J. R. **Produção de biomassa de gandu em função de diferentes densidades e espaçamentos entre sulcos de plantio**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2003. 5 p.

NIE, Z. N.; WARD, G. N.; MICHAEL, A. T. Impact of pugging by dairy cows on pastures and indicators of pugging damage to pasture soil on South – western Victoria. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.52, n.1, p.37-43, 2001.

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

RAMOS, B. Z.; PAIS, P. S. M.; FREITAS, W. A.; JÚNIOR, M. S. D. Avaliação dos atributos físico-hídrico em um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes sistemas de manejo-Lavras/Minas/Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v.36, n.3, p.340-346, 2013.

RAWLS, W.J.; GISH, T.J.; BRAKENSIEK, D.L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advances in Soil Science**, Madison, v.16, p.213-234, 1991.

RAYOL, B.P.; ALVINO-RAYOL, F. O. Uso de feijão guandú (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) para adubação verde e manejo agroecológico de plantas espontâneas em reflorestamento no estado do Pará. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Porto Alegre, n.7, v.1, p.104-110, 2012.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v.27, n.1, p.29-48, 2003.

RIVERO, S.; ALMEIDA, O.; ÁVILA, S.; WESLEY OLIVEIRA, W. Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova Economia**, v.19, n.1, p.41-66, 2009.

SALES, L.E.O.; CARNEIRO, M.A.C.; SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; FERREIRA, M.M. Qualidade física de Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.3, p.667-674, 2010.

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

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.4, p.844-851, 1996.

SILVA, A. H.; FAVARETTO, N.; CAVALIERI, K. M. V.; DIECKOW, J.; VEZZANI, F. M.; PARRON, L. M.; CHEROBIM, V. F.; MARIOTI, J. FERRARI NETO, H. Atributos físicos do solo e escoamento superficial como indicadores de serviços ambientais. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G. PRADO, B. **Serviços ambientais em sistemas agrícola e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília: Embrapa, 2015. p.71-83.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, D. M. P.; CAMPOS, M. C. C.; FRANCISCON, U.; ALHO, L. C.; SANTOS, L. A. C.; NETO PAULA, P.; BERGAMIM, A. C.; SOUZA, Z. M. Spatial variability of soil properties in archeological dark Earth sites under cacao cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.40, n.2, p.1-12, 2016.

SILVA, R. B.; MASQUETTO, B. J.; LANÇAS, K. P.; SILVA, F. A. M. Desenvolvimento, automação e desempenho de um consolidômetro com interface homem-máquina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, n.2, p.416-427, 2015.

SMITH, N. J. H. Anthrosols and human carrying capacity in Amazonia. **Annals of the Association of American Geographers**, v.70, n.4, p.553-566, 1980.

SNEDECOR, G. W.; COCHARAN, W. G. **Statistical methods**. 8. Ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503p.

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; CUNHA, J. M. C.; MANTOVANELLI, B. C.; OLIVEIRA, BRITO FILHO, E. G.; LEITE, A. F. Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Gaia Scientia**, Recife, v.12, n.2, p.125-133, 2018.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Compressibility of oxisol aggregates under no-till in response to soil water potential. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.6, p.1525-1533, 2009.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p.573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.211-219, 2007.

TORRES, L. C. BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V. Alterações na qualidade física de um Latossolo Amarelo sob pastagem. **Acta Amazônica**, Manaus, v.44, n.4, p.419-426, 2014.

Van GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

VIEIRA SR. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, p.181-190, 1997.

WILLATT, S.T.; PULLAR, D.M. Changes in soil physical properties under grazes pastures. **Australian Journal of Soil Research**, v.22, n.3, p.343-348, 1983.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. **Geoderma**, Amsterdam, v.114, n.3-4, p.401-414, 2003.