



**ATRIBUTOS DO SOLO E DA SERAPILHEIRA EM ÁREA DE  
FLORESTA DE TERRA FIRME SOB MANEJO FLORESTAL  
EXPLORADA DE 2003 A 2009 NO ESTADO DO AMAZONAS**

**BÁRBARA DE OLIVEIRA BOMFIM**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**ATRIBUTOS DO SOLO E DA SERAPILHEIRA EM ÁREA  
DE FLORESTA DE TERRA FIRME SOB MANEJO  
FLORESTAL EXPLORADA DE 2003 A 2009 NO ESTADO  
DO AMAZONAS**

**BÁRBARA DE OLIVEIRA BOMFIM**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. REGINALDO SÉRGIO PEREIRA**

**CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. ALCIDES GATTO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL - UnB**

**PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM-193/2013**

**BRASÍLIA/DF ABRIL DE 2013**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**ATRIBUTOS DO SOLO E DA SERAPILHEIRA EM ÁREA DE  
FLORESTA DE TERRA FIRME SOB MANEJO FLORESTAL  
EXPLORADA DE 2003 A 2009 NO ESTADO DO AMAZONAS**

**BÁRBARA DE OLIVEIRA BOMFIM**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

**PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM-193/2013**

APROVADO POR:

---

Prof. Dr. REGINALDO SÉRGIO PEREIRA

Professor da Faculdade de Tecnologia/Departamento de Engenharia Florestal – UnB  
reginaldosp@unb.br (ORIENTADOR)

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. ALBA VALERIA REZENDE

Professora da Faculdade de Tecnologia/Departamento de Engenharia Florestal – UnB  
albavr@unb.br (EXAMINADOR INTERNO)

---

Prof. Dr. NIRO HIGUCHI

Professor do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA  
niro@inpa.gov.br (EXAMINADOR EXTERNO)

---

Prof. Dr. ERALDO APARECIDO TRONDOLI MATRICARDI

Professor da Faculdade de Tecnologia/Departamento de Engenharia Florestal – UnB  
ematricardi@unb.br (SUPLENTE INTERNO)

Brasília/DF, 19 de abril de 2013.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília. Acervo 1007785.

Bomfim, Bárbara de Oliveira.  
B695a Atributos do solo e da serapilheira em área de floresta de terra firme sob manejo florestal explorada de 2003 a 2009 no estado do Amazonas / Bárbara de Oliveira Bomfim. -- 2013. 106 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, 2013. Inclui bibliografia.  
Orientação: Reginaldo Sérgio Pereira ; Coorientação: Alcides Gatto.

1. Solos - Análise - Amazônia. 2. Matéria orgânica - Solos - Análise. 3. Manejo florestal. I. Pereira, Reginaldo Sérgio. II. Gatto, Alcides. III. Título.

CDU 631.41

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BOMFIM, B. O. (2013). Atributos do solo e da serapilheira em área de floresta de terra firme sob manejo florestal explorada de 2003 a 2009 no Estado do Amazonas. Dissertação de mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM – 193/2013, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, DF. 106 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Bárbara de Oliveira Bomfim

TÍTULO: Atributos do solo e da serapilheira em área de floresta de terra firme sob manejo florestal explorada de 2003 a 2009 no Estado do Amazonas

GRAU: Mestre

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor

---

Bárbara de Oliveira Bomfim  
bbomfim@hotmail.com

**Dedico à minha família, em especial a meus pais, irmão e avós.**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao projeto INCT – Madeiras da Amazônia pela oportunidade de desenvolver pesquisa na Amazônia e pelo apoio logístico e financeiro para o trabalho de campo.

À CAPES pela bolsa de Mestrado.

Aos meus pais pela ajuda e incentivo à minha carreira acadêmica.

Ao professor Reginaldo Pereira, meu orientador, pela oportunidade e tempo investido nesse projeto.

Ao professor Alcides Gatto pela fundamental co-orientação.

Ao professor Niro Higuchi, pelo curso de Manejo Florestal durante a graduação e disciplina da pós-graduação, Madeiras da Amazônia, na ZF-2, que certamente aumentaram muito meu interesse pela floresta Amazônica.

À minha equipe de campo pela ajuda na coleta de dados: Fabiano Emmert, que me ajudou muito durante toda a dissertação, Reginaldo Pereira, Raquel Fernandes e Zezão.

Aos funcionários da Mil Madeiras Preciosas que me forneceram estrutura e dados fundamentais para o desenvolvimento da minha pesquisa.

Ao DPP – UnB pelo auxílio financeiro a meu trabalho de campo.

Ao DEF – UnB pelo auxílio financeiro às análises de laboratório.

Aos professores do Departamento de Engenharia Florestal – UnB: José Roberto Rodrigues Pinto, Eraldo Matricardi e Alba Rezende pelas devidas orientações durante a elaboração da dissertação; e Ailton e Cláudio Del Menezzi pelo apoio quanto ao uso dos Laboratórios de Tecnologia de Madeira.

Ao Vanduí pelo auxílio no Laboratório de Tecnologia da Madeira – FAL.

Ao meu querido namorado Urtzi que sempre me enviou muito ânimo!

A todos os colegas da pós-graduação pela ajuda em análises de dados, instalação de programas estatísticos e companhia maravilhosa durante os dias de elaboração da dissertação: Fabiano, Fabrícia, Fabrício, Glória, Olívia, Henrique, Kamilla, Lamartine e Alexandre.

A todos os meus amigos que sempre me incentivaram e perguntaram quando eu terminaria o Mestrado...

**MUITO OBRIGADA!!!**

## RESUMO

Este estudo objetivou avaliar os atributos físicos e químicos do solo e da serapilheira de florestas de terra firme em Unidades de Produção Anuais (UPAs) submetidas à exploração madeireira em 2003, 2005, 2007 e 2009, bem como comparar os resultados das UPAs com a Área de Proteção Absoluta (APA). A coleta de dados foi realizada durante período chuvoso em 15 parcelas permanentes de 100 m x 50 m, três em cada UPA e três na APA, amostradas sistematicamente na área de manejo florestal da empresa Mil Madeiras Preciosas LTDA, localizada em Silves/AM. Nas parcelas foram coletadas amostras de serapilheira em subparcelas de 0,5 m x 0,5 m, amostras compostas de solo em três profundidades (0-10, 10-30 e 30-50 cm) e dados de resistência do solo a penetração (RP) com um penetrômetro de impacto (0-50 cm). Ademais, em cada UPA, foram coletados dados de RP (0-50 cm) em três trilhas de arraste e em três pátios de estocagem de madeira. Nessas amostras, foram determinados os atributos físicos e químicos do solo em laboratório. Para as amostras coletadas de serapilheira foram calculados os respectivos estoques em megagrama por hectare ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) e determinados os teores de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg e CO). O solo foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico e Álico com textura argilosa. A densidade do solo variou entre 1,50 e 1,83  $\text{g cm}^{-3}$ , sendo verificada diminuição com o aumento da idade pós-exploração, com diferença significativa entre UPAs e APA pelo teste de Scott-Knott. Os valores de RP das UPAs e da APA não diferiram estatisticamente entre si, sendo, em geral,  $\leq 3,0$  MPa. A RP nas trilhas de arraste foi alta ( $> 3,0$  MPa) e houve diferença significativa entre UPAs, com RP na área de rodagem do *skidder* superior ao centro. Nos pátios, os valores de RP foram muito altos ( $> 5,0$  MPa), sendo os locais que mais sofreram a influência das máquinas florestais e das toras retiradas. Os solos apresentaram alta acidez ativa e baixa fertilidade, com baixa soma de bases, baixos teores de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ , Na e K, teores muito baixos de P, bem como teores de S variando de médios a adequados. Os teores de matéria orgânica e CO variaram entre médios e altos. Houve diferença significativa entre UPAs e APA para S,  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , saturação por bases e saturação por alumínio, mas seus elevados teores de matéria orgânica, juntamente com a etapa de pré-arraste realizada nas UPAs, minimizaram os prováveis distúrbios causados pela exploração florestal à qualidade física e química do solo. As UPAs apresentaram maior estoque de serapilheira que a APA, com diminuição significativa ao longo dos anos pós-exploração. Houve diferença significativa para os teores de potássio, cálcio e carbono orgânico da serapilheira entre as UPAs e a APA. De modo geral, verificou-se que o tempo pós-exploração evidenciou pouca dissimilaridade entre as UPAs e a APA quanto aos atributos do solo e da serapilheira avaliados.

**Palavras-chave:** Floresta Amazônica; Matéria orgânica do solo; Unidade de Produção Anual; Análise de agrupamentos; Manejo florestal de rendimento sustentado.

## ABSTRACT

This study aimed at assessing litter and soil physical and chemical properties of terra firme forests in Logging Settings (UPAs) logged in 2003, 2005, 2007 and 2009, as well as comparing the results of each UPA with a Protected Area (APA). Data collection was carried out during rainy season in 15 permanent plots of 100 m x 50 m (three in each UPA and three in the APA) systematically sampled in the forest management area of the company Mil Madeiras Preciosas LTDA, in Silves/AM. Within each plot, litter was sampled in 0.5 m x 0.5 m subplots, composed soil samples were taken at three depths (0-10, 10-30 and 30-50 cm) and soil resistance to penetration (RP) was sampled using an impact penetrometer (0-50 cm). Furthermore, in each UPA, RP data was collected (0-50 cm) on three skid trails and in three log decks. For these samples, physical and chemical properties were determined in laboratory. In addition, litter stock ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) and content of nutrients (N, P, K, Ca, Mg and CO) were determined for litter samples. Soil was classified as dystrophic allic Yellow Oxisol with clayey texture. Soil density ranged between 1.50 and 1.83  $\text{g cm}^{-3}$ , whereas it was verified decrease with the rise in the age after logging, with significant difference between UPAs and APA by Scott-Knott's test. RP values of UPAs and APA did not statistically differ from each other and were, in general,  $\leq 3.0$  MPa. RP in the skid trails was high ( $> 3.0$  MPa) and there was significant difference among UPAs, with higher RP values on the edges of the skid trails compared to the center of the trails. RP values in the log dumps, which were considered the most affected sites by forestry machinery, were very high ( $> 5.0$  MPa). Soils presented high acidity and low fertility, with low sum of bases, low contents of  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ , Na and K, very low contents of P, as well as S contents ranging from medium to appropriate. Organic matter and organic carbon contents varied from medium to high. There was significant difference between UPAs and APA for sulfur,  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , base saturation and aluminum saturation, but their high contents of organic matter, in conjunction with the log pre-winchling stage conducted in the UPAs, minimized some possible disturbances causes by forest logging to soil physical and chemical quality. UPAs presented higher litter stock than APA, with significant decrease throughout the years after logging. There was significant difference for litter contents of K,  $\text{Ca}^{2+}$  and organic carbon between UPAs and APA. Overall, it was verified that the years after logging evinced low dissimilarity between UPAs and APA with respect to the soil and litter properties analyzed.

**Key-words:** Amazon Forest; Soil organic matter; Logging setting; Cluster analysis; Sustainable forest management.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>7</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>8</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1. OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
1.1.1 Objetivo geral .....	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 EXPLORAÇÃO FLORESTAL NA AMAZÔNIA.....</b>	<b>18</b>
2.1.1 Efeitos da exploração florestal realizada na Amazônia .....	20
<b>2.2 SOLOS DA AMAZÔNIA .....</b>	<b>21</b>
2.2.1 Atributos físicos de solos da Amazônia.....	21
2.2.2 Atributos químicos de solos da Amazônia .....	24
<b>2.3 SERAPILHEIRA .....</b>	<b>26</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2 SISTEMA DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3 AMOSTRAGEM E OBTENÇÃO DOS DADOS .....</b>	<b>30</b>
3.3.1 Delimitação da área de estudo .....	30
3.3.2 Histórico da Exploração Florestal nas UPAs estudadas .....	32
3.3.3 Amostragem da serapilheira .....	33
3.3.4 Amostragem do solo.....	34
3.3.5 Resistência do solo a penetração (RP).....	35
<b>3.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO.....</b>	<b>37</b>
3.4.1 Granulometria .....	37
3.4.2 Densidade do solo (Ds) .....	38
3.4.3 Porosidade total (Pt).....	38
3.4.4 Umidade volumétrica (Uv) .....	38
3.4.5. Resistência do solo a penetração (RP).....	39
<b>3.5 PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO.....</b>	<b>39</b>
3.5.1 Avaliação da acidez e fertilidade do solo .....	39
3.5.2 Estoque de carbono orgânico (ECO).....	40

	10
<b>3.6 BIOMASSA E PROPRIEDADES QUÍMICAS DA SERAPILHEIRA .....</b>	<b>40</b>
<b>3.7 ANÁLISE DOS DADOS .....</b>	<b>40</b>
3.7.1 Atributos físicos e químicos do solo .....	41
3.7.2 Atributos da serapilheira.....	41
3.7.3 Análises multivariadas.....	42
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 ATRIBUTOS FÍSICOS DOS SOLOS DA APA E DAS UPAs EXPLORADAS EM 2003, 2005, 2007 E 2009 .....</b>	<b>43</b>
4.1.1 Resistência do solo a penetração (RP).....	46
<b>4.2 ATRIBUTOS QUÍMICOS DOS SOLOS DA APA E DAS UPAs EXPLORADAS EM 2003, 2005, 2007 E 2009.....</b>	<b>52</b>
4.2.1 Avaliação da acidez e fertilidade do solo .....	52
4.2.2 Matéria orgânica (MO) e carbono orgânico (CO).....	55
4.2.3 Estoque de carbono orgânico (ECO).....	56
<b>4.3 ORDENAÇÃO DAS ÁREAS EM RELAÇÃO AOS ATRIBUTOS DO SOLO</b>	<b>57</b>
<b>4.4 BIOMASSA E NUTRIENTES DAS SERAPILHEIRAS DA APA E DAS UPAs EXPLORADAS EM 2003, 2005, 2007 E 2009.....</b>	<b>60</b>
<b>4.5 ORDENAÇÃO DA APA E DAS UPAs EM RELAÇÃO À SERAPILHEIRA .</b>	<b>63</b>
<b>4.6 CLASSIFICAÇÃO DAS UPAs E DA APA.....</b>	<b>65</b>
<b>5. DISCUSSÃO .....</b>	<b>67</b>
<b>5.1 ATRIBUTOS FÍSICOS DOS SOLOS DAS UPAs E DA APA .....</b>	<b>67</b>
5.1.1 Resistência do solo a penetração (RP).....	70
<b>5.2 ATRIBUTOS QUÍMICOS DOS SOLOS DAS UPAs E DA APA .....</b>	<b>73</b>
5.2.1 Avaliação da acidez e fertilidade do solo .....	73
5.2.2 Matéria orgânica (MO) e carbono orgânico (CO).....	76
5.2.3 Estoque de carbono orgânico (ECO).....	79
<b>5.3 ORDENAÇÃO DAS UPAs E DA APA EM RELAÇÃO AOS ATRIBUTOS DOS SOLOS.....</b>	<b>80</b>
<b>5.4 BIOMASSA E NUTRIENTES DAS SERAPILHEIRAS DAS UPAs E DA APA .....</b>	<b>82</b>
<b>5.5 ORDENAÇÃO DAS UPAs E APA EM RELAÇÃO AOS ATRIBUTOS DAS SERAPILHEIRAS.....</b>	<b>84</b>
<b>5.6 CLASSIFICAÇÃO DAS UPAs E DA APA.....</b>	<b>85</b>

<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>87</b>
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>102</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> - Histórico da exploração florestal das UPAs estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. ....	33
<b>TABELA 2</b> - Atributos físicos dos solos amostrados na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si, na coluna, pelo teste de Scott-Knott ( $P < 0,05$ ). Prof = profundidade; Arg = argila; Uv = umidade volumétrica; Ds = densidade do solo; Pt = porosidade total; RP = resistência do solo a penetração; CV = coeficiente de variação. ....	44
<b>TABELA 3</b> - Atributos químicos dos solos amostrados na área de manejo na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si, na linha, pelo teste de Scott-Knott ( $P < 0,05$ ). Letras minúsculas referem-se à comparação entre áreas e letras maiúsculas à comparação entre profundidades. Médias sem letras não apresentaram diferenças significativas. Prof = profundidade; CO = carbono orgânico; MO = matéria orgânica, P = fósforo disponível; $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ = cálcio + magnésio trocável; K = potássio disponível; Na = sódio; $Al^{3+}$ = alumínio trocável; H+Al = acidez potencial; CTC = capacidade de troca catiônica; V = saturação por bases; m = saturação por alumínio. ....	53
<b>TABELA 4</b> - Autovetores e coeficientes de correlação entre os atributos dos solos e os dois componentes principais obtidos a partir da PCA para os solos coletados na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. ....	59
<b>TABELA 5</b> - Escores das áreas estudadas e suas respectivas profundidades em relação aos dois componentes principais da PCA para os atributos físicos e químicos dos solos coletados na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. ....	59
<b>TABELA 6</b> - Comparação entre as médias dos nutrientes ( $g\ kg^{-1}$ ) na serapilheira coletada nas subparcelas de 0,5 x 0,5 m amostradas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. Os valores entre parênteses representam o desvio padrão. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si, na coluna, pelo teste de Scott-Knott ( $P < 0,05$ ). Médias sem letras não apresentaram diferenças significativas. N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; S = enxofre; CO = carbono orgânico. ....	62
<b>TABELA 7</b> - Autovetores e coeficientes de correlação entre os atributos da serapilheira e os dois componentes principais obtidos a partir da PCA para as amostras de serapilheira coletadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. ....	64

<b>TABELA 8-</b> Escores das parcelas amostradas em relação aos eixos dos componentes principais da PCA para biomassa e nutrientes das serapilheiras coletadas nas áreas estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. ....	65
--	----

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1.** Mapa de localização da área de manejo florestal com cada UPA (Unidade de Produção Anual) e APA (Área de Proteção Absoluta) estudada na empresa Mil Madeiras Preciosas, Estado do Amazonas. Os anos referem-se à exploração florestal de cada UPA e Mil Madeiras Preciosas, em vermelho, representa a localização da sede da empresa. ....28
- FIGURA 2.** Mapa da UPA MV01 (explorada em 2009) com a localização de estradas, trilhas de arraste, cursos d'água e parcelas permanentes (amarelo) na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.....30
- FIGURA 3.** Mapa de localização de parcela permanente estudada na UPA MV01 (2009), Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. Os pontos vermelhos referem-se ao planejamento da amostragem e os pretos referem-se aos pontos coletados com GPS, em campo.....31
- FIGURA 4.** Mapa de localização dos pontos amostrados (marcados com GPS) na parcela permanente do fragmento de APA estudado na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. ....32
- FIGURA 5.** Parcela permanente da UPA MV01 (2009). A) Aspecto visual da árvore marcada para medição do diâmetro durante o inventário florestal realizado periodicamente. B) Subparcela de 0,5 m x 0,5 m lançada em cada ponto de amostragem para coleta das amostras de serapilheira nas UPAs e APA estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.....34
- FIGURA 6.** Coleta de amostra de solo em ponto de amostragem pelo método do anel volumétrico. A) Inserção do anel volumétrico no solo na camada de 30 a 50 cm. B) Anel volumétrico retirado com a amostra solo, na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.....35
- FIGURA 7.** Coleta de dados de resistência do solo a penetração (RP) nos pontos de amostragem. A) Penetrômetro de impacto utilizado para medição da RP. B) Processo de contagem dos golpes do penetrômetro de acordo com a leitura da profundidade, na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. ....36
- FIGURA 8.** Trilhas de arraste de toras utilizadas pelo *skidder* na exploração florestal. A) UPA A1A (2003). B) UPA MV01 (2009); com a indicação dos locais de coleta de RP: triângulo amarelo: centro da trilha; triângulos vermelhos: lateral direita e esquerda (rogadem), na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.....36
- FIGURA 9.** Pátios de estocagem de madeira na área de manejo florestal. A) UPA A1A (2003). B) UPA MV01 (2009), na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.....37
- FIGURA 10.** Resistência do solo a penetração (RP) ao longo da profundidade (0 – 50 cm) nas parcelas permanentes das UPAs estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. ....47
- FIGURA 11.** Resistência do solo a penetração (RP) ao longo da profundidade (0 – 50 cm) na parcela permanente da APA estudada na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.....48

<b>FIGURA 12.</b> Resistência do solo a penetração (RP) ao longo da profundidade (0 – 50 cm) nas trilhas de arraste (eixo e rodagem) das UPAs estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.....	49
<b>FIGURA 13.</b> Resistência do solo a penetração ao longo da profundidade (0 – 50 cm) em pátios de estocagem de madeira das UPAs estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.....	51
<b>FIGURA 14.</b> Valores médios de estoque de carbono orgânico (ECO), em $\text{Mg ha}^{-1}$ , nas três profundidades, em cm, dos solos amostrados nas UPAs e na APA da Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. As letras minúsculas referem-se à comparação entre as áreas e as letras maiúsculas à comparação entre as profundidades. ....	57
<b>FIGURA 15.</b> Diagrama de ordenação ( <i>biplot</i> ) produzido pela análise de componentes principais (PCA) com base nos atributos químicos e físicos, por profundidade, dos solos coletados na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. O diagrama foi construído a partir dos dois componentes principais. 1 = 0 a 10 cm; 2 = 10 a 30 cm; e 3 = 30 a 50 cm de profundidade do solo. ....	58
<b>FIGURA 16.</b> Valores médios dos estoques de serapilheira, em $\text{Mg ha}^{-1}$ , das UPAs e APA estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. Os valores acima das barras representam as médias de cada UPA e APA. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ( $P < 0,05$ ). ....	61
<b>FIGURA 17.</b> Diagrama de ordenação ( <i>biplot</i> ) produzido pela análise de componentes principais (PCA) com base na biomassa e nos nutrientes das serapilheiras coletadas nas parcelas permanentes das UPAs e da APA estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. O diagrama foi construído a partir dos dois componentes principais. ....	63
<b>FIGURA 18.</b> Dendrograma de classificação por análise de agrupamentos pelo método de ligação de médias ponderadas (WPGMA) e coeficiente de Bray-Curtis referente a: A) Atributos dos solos e da serapilheira. B) Parcelas das UPAs e da APA estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. (linha vermelha: nível de corte de 50% de dissimilaridade). ....	66

## 1. INTRODUÇÃO

A Amazônia brasileira, constituída de diversas tipologias florestais, apresenta grande riqueza e diversidade de espécies arbóreas (PITMAN et al., 2008). Trata-se do maior reservatório natural da diversidade vegetal do planeta (OLIVEIRA; AMARAL, 2004) e última reserva de madeira tropical do mundo (HIGUCHI, 2010), ocupando cerca de 60% do território nacional (PEREIRA et al., 2010).

Apesar de contar com instrumentos legais para sua proteção, no que diz respeito ao manejo florestal, o desflorestamento anual na Amazônia Legal continua aumentando (MARTINS et al., 2012). Embora essa região tenha apresentado redução de 27% na taxa de desmatamento por corte raso entre 2011 e 2012, o Estado do Amazonas apresentou aumento de 29% nessa taxa durante o mesmo período (INPE, 2012). Sendo assim, o Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) na Amazônia, principalmente no Estado do Amazonas, é uma opção para conciliar conservação e produção florestal, a fim de minimizar os impactos e manter os serviços ambientais que a floresta proporciona (CARNEIRO, 2010; AMARAL; PINTO, 2012). Segundo Higuchi (1994), manejar a floresta sob regime de rendimento sustentado é uma forma inteligente de uso do solo amazônico.

O manejo florestal de rendimento sustentado ajuda na manutenção da regeneração natural, da qualidade da água e na proteção da biodiversidade, tanto da fauna quanto da flora (NEPSTAD et al., 1999). Segundo Pinard et al. (1995), o principal objetivo da exploração florestal realizado por empresas com certificação florestal é a redução dos distúrbios no solo e na vegetação remanescente em, pelo menos, 50% em comparação com a exploração florestal convencional.

A efetividade e os impactos de PMFS somente podem ser avaliados por meio do contínuo monitoramento das etapas envolvidas no plano de manejo. Segundo Mello-Ivo e Ross (2006), os estudos que avaliam o efeito dos diferentes métodos de limpeza de áreas florestais para cultivos agrícolas têm constatado impactos negativos no solo. Porém, são escassas as informações sobre o grau e distribuição desses impactos em áreas parcialmente perturbadas (FERREIRA et al., 2004). Além disso, o efeito da presença de árvores remanescentes na recuperação das propriedades dos solos é pouco conhecido ou contraditório (MELLO-IVO; ROSS, 2006).

Segundo Arnup (1998), há uma grande incerteza em relação aos efeitos dos distúrbios no solo no crescimento e na produtividade florestal. Isso ocorre devido à falta

de estudos de crescimento a longo prazo, aos efeitos complexos de operações florestais prévias em estudos já realizados e à complexidade dos fatores que interagem durante e depois do distúrbio no solo (REICHERT et al., 2007).

Ao longo do tempo, muitas pesquisas sobre a exploração florestal deram ênfase principalmente aos aspectos silviculturais e às mudanças sofridas após a exploração florestal na composição de espécies (HALL et al., 2003; FIGUEIRA, 2006). Já foram realizados diversos estudos sobre os impactos da exploração florestal na regeneração da vegetação na Amazônia brasileira (CARNEIRO, 2010; HIRAI et al., 2012), assim como nas propriedades do solo e da serapilheira (FERREIRA et al., 2002; MELLO-IVO; ROSS, 2006; HIRAI, 2008; LOPES et al., 2011). Entretanto, há relativamente pouca informação sobre o comportamento das propriedades físicas e químicas do solo e da serapilheira (NEVES et al., 2001) ao longo do tempo e sua relação com a regeneração natural da floresta Amazônica.

Nesse contexto, o presente estudo visou avaliar as propriedades do solo e da serapilheira em áreas submetidas à exploração florestal, cujo sistema compreende etapas e técnicas que minimizam o impacto dessa atividade na floresta, em diferentes anos, com o intuito de investigar se essas propriedades, principalmente as do solo, sofrem alterações significativas em consequência dessa exploração.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo geral do trabalho foi avaliar os atributos do solo e da serapilheira em floresta de terra firme submetida à exploração madeireira em 2003, 2005, 2007 e 2009. Além disso, objetivou-se comparar os resultados encontrados nos diferentes anos com uma Área de Proteção Absoluta (APA).

### **1.1.2 Objetivos específicos**

a) Quantificar os atributos físicos e químicos do solo em parcelas permanentes dentro de cada Unidade de Produção Anual (UPA) estudada e na Área de Proteção Absoluta (APA);

- b) Avaliar a resistência do solo a penetração em parcelas permanentes, trilhas de arraste e pátios de estocagem dentro de cada UPA e APA estudadas;
- c) Quantificar a biomassa e os teores de nutrientes da serapilheira em parcelas permanentes dentro de cada UPA e APA estudadas;
- d) Comparar os valores dos atributos físicos e químicos do solo e da serapilheira obtidos em cada UPA com aqueles encontrados na APA;
- e) Classificar as UPAs e a APA em relação aos atributos do solo e da serapilheira.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 EXPLORAÇÃO FLORESTAL NA AMAZÔNIA**

Aproximadamente 44% da área da Amazônia Legal são formados por áreas protegidas, compostas por Terras Indígenas (49%) e Unidades de Conservação (51%) (PEREIRA et al., 2010), enquanto 23% são áreas privadas e 27% correspondem a terras devolutas e privadas em disputa (IBGE, 2007). Diante desse cenário, no segundo semestre de 2012, foram registrados 972 km<sup>2</sup> de florestas intensamente exploradas pela atividade madeireira e/ou queimadas na Amazônia Legal (71% inferior ao mesmo período em 2011), dos quais 71% foram registrados em áreas privadas ou sob diversos estágios de posse (MARTINS et al., 2012). Observa-se, portanto, que mesmo contando com aspectos legais para sua proteção, o desflorestamento na Amazônia continua aumentando.

Na Amazônia brasileira, apesar de sua elevada riqueza de espécies arbóreas, com 190 a 300 espécies por hectare de floresta (MATOS; AMARAL, 1999; OLIVEIRA; MORI, 1999), a exploração de madeira é predominantemente seletiva e centrada em floresta primária (HIGUCHI, 2010). Em geral, entre 38 a 60 espécies são exploradas comercialmente, mas esse valor pode aumentar (157 espécies) se forem também incluídas as espécies com uso potencial de comercialização (SILVA, 1999). Mesmo explorando poucas espécies, os 71 polos processadores de madeira da Amazônia Legal extraíram, em 2009, aproximadamente 14,2 milhões de metros cúbicos de madeira em tora na região, com 41% de rendimento médio do processamento (PEREIRA et al., 2010). De acordo com os autores, a estimativa da receita bruta gerada pela indústria madeireira no mesmo período foi cerca de R\$ 4,9 bilhões.

A exploração madeireira na Amazônia, de forma geral, ainda é feita de forma não sustentável (AMARAL; PINTO, 2012). Primeiramente, segundo os autores, os madeireiros entram na floresta para extrair as espécies mais valiosas, retornando à mesma área, em intervalos cada vez mais curtos, para retirar o restante das árvores com algum valor econômico. A falta de experiência em práticas de manejo, a baixa capacidade de monitoramento e fiscalização, além da falta de uma política florestal coerente para a região que incentive o manejo e o zoneamento florestal, por exemplo, estão entre alguns motivos para a exploração madeireira predatória atual (AMARAL; PINTO, 2012).

A questão fundamental é que a floresta amazônica deve gerar produtos para outros ciclos de corte, princípio básico do manejo florestal em regime de rendimento sustentado com sistema policíclico (HIGUCHI, 1994). Nesse contexto, Mello-Ivo e Ross (2006) sugerem a extração seletiva de madeira como uma forma sustentável de uso da terra para ecossistemas florestais da Amazônia, uma vez que permite a manutenção da maior parte da biomassa florestal. Porém, a exploração seletiva apresenta diversas limitações. Dentre essas limitações, destaca-se a grande demanda por poucas espécies, refletindo em baixa taxa de crescimento das espécies exploradas (KELLER et al., 2007), as quais dependem da regeneração natural para sua conservação (MARTINS et al., 2003). Além disso, outra limitação é o alto custo desse tipo de exploração florestal, já que envolve diversas etapas durante o planejamento e execução (UHL et al., 1997).

Sendo assim, atualmente, o manejo florestal de rendimento sustentado (PMFS) na Amazônia se constitui como uma técnica de conservação dos ecossistemas que propicia o uso da madeira de forma planejada, melhora das condições de vida das populações e a manutenção da floresta (PINHO et al., 2009). A legislação brasileira descreve duas categorias de PMFS para a produção madeireira: Baixa Intensidade, que não utiliza máquinas para o arraste e segue requisitos específicos; e Pleno, no qual máquinas são utilizadas para o arraste de toras, com requisitos técnicos específicos (BRASIL, 2006). Além disso, a legislação prevê um diâmetro mínimo de corte (DMC) de 50 cm e ciclo de corte entre 25 e 35 anos.

Ambas as categorias de PMFS diferem quanto à intensidade de corte máxima permitida pela legislação brasileira. Os PMFSs de Baixa Intensidade podem explorar até 10 m<sup>3</sup>/ha (média de três árvores por hectare). Já os PMFS Plenos tem a intensidade de corte limite de 30 m<sup>3</sup>/ha (BRASIL, 2006).

### **2.1.1 Efeitos da exploração florestal realizada na Amazônia**

A exploração madeireira e seus efeitos na vegetação remanescente, no solo e na regeneração natural devem ser levados em conta no manejo de florestas na Amazônia (MARTINS et al., 1998; 2003). Segundo esses autores, tais impactos têm implicações diretas na autoecologia das espécies envolvidas na exploração madeireira, uma vez que a floresta é diretamente afetada. As atividades envolvidas na exploração podem inibir a regeneração natural por meio de alterações nas propriedades do solo como, por exemplo, a densidade, responsável pela diminuição do estabelecimento e crescimento da regeneração natural em florestas tropicais (FREDERICKSEN; PARIONA, 2001).

Segundo Vieira (1995), a exploração florestal altera os níveis de luminosidade e as condições do solo por meio da abertura de clareiras e distúrbios no solo. O autor sugere que as clareiras favorecem espécies não comerciais, o que indica a necessidade de plantios de enriquecimento. Já um estudo sobre o efeito da exploração florestal em escala experimental na regeneração de espécies arbóreas, realizado na Estação Experimental de Silvicultura do INPA (ZF-2), no Estado do Amazonas, indicou que a exploração apresentou potencial para ser uma atividade economicamente e ecologicamente sustentável na Amazônia. Porém, foi indicada a necessidade de estudos em maiores escalas visando um planejamento florestal em escala regional (MAGNUSSON et al., 1998).

Monteiro et al. (2004), analisando os impactos da exploração madeireira e do fogo em florestas de transição na Amazônia Legal, verificaram que a composição e a estrutura das florestas variaram em função da intensidade da exploração, do fogo e do tempo pós-distúrbio. Após tais eventos, segundo os autores, o estoque de madeira de espécies comerciais nas florestas perturbadas foi significativamente menor que na floresta intacta.

Hirai (2008), avaliando os efeitos da exploração florestal no solo e na regeneração natural em área de manejo florestal no Pará, verificou alteração na estrutura física do solo e a persistência do mesmo ao longo do tempo. Além disso, a autora concluiu que os pátios de estocagem e as trilhas de arraste foram os locais mais afetados pela exploração seletiva de madeira.

Silveira (2012) avaliou a exportação de nutrientes pela exploração florestal em área de manejo florestal no Amazonas. A autora quantificou os nutrientes do solo, os exportados através da madeira e aqueles devolvidos ao solo através da serapilheira.

Conclui-se que os estoques de nutrientes exportados pela exploração madeireira foram inferiores às quantidades de nutrientes ciclados anualmente via serapilheira, para as espécies florestais exploradas comercialmente estudadas pela autora.

Quanto menos alterações nos atributos do solo, os objetivos do manejo florestal de rendimento sustentado são mais facilmente atingidos (MACHADO, 2004). Essa sustentabilidade depende, dentre outros, da intensidade de exploração, da taxa de regeneração da floresta depois do corte, do crescimento e do intervalo entre colheitas (HIGMAN et al., 1999).

## **2.2 SOLOS DA AMAZÔNIA**

Os solos amazônicos, do ponto de vista de sua formação, a fase mineral é altamente intemperizada, com elevada acidez e baixa fertilidade (DAVIDSON et al., 2004). Essa última característica está também presente nos solos sob floresta de terra firme, que ocupam aproximadamente 90% da região (FALCÃO; BORGES, 2006), com predomínio de Latossolos Amarelos e Argissolos Vermelho-amarelo (RADAMBRASIL, 1975; SOUZA et al., 2004). Os componentes minerais da fração argila são predominantemente caulinita, argila de baixa atividade, com quantidade variável de óxidos de ferro (hematita e goethita) e alumínio (gibssita) (CERRI et al., 1999). Segundo esses autores, a capacidade de troca de cátions é baixa e o alumínio trocável é relativamente alto.

A manutenção da produtividade florestal é garantida, portanto, pela ciclagem rápida e praticamente fechada de nutrientes contidos na biomassa (CUEVAS, 2001) e por meio da entrada de nutrientes pela água da chuva. Além disso, as condições de calor, alta umidade e alta diversidade biológica auxiliam na rápida decomposição e mineralização da matéria orgânica do solo, disponibilizando para as plantas os nutrientes nela contidos (FRANKEN et al., 1985; HIGUCHI et al., 1997; FERREIRA et al., 2002).

### **2.2.1 Atributos físicos de solos da Amazônia**

Os atributos do solo relacionados com os aspectos físicos são de extrema importância, já que influenciam o funcionamento e o manejo do solo em um ecossistema florestal (BRADY; WEIL, 2008). De acordo com os autores, qualidade

física do solo é sua capacidade de promover às raízes das plantas condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento, com destaque para textura, estrutura, densidade, disponibilidade de água, ar e resistência do solo a penetração.

A textura do solo é uma das características físicas mais estáveis. Representa a distribuição quantitativa das partículas de areia, silte e argila quanto ao tamanho (FERREIRA, 2010). Essas frações texturais do solo apresentam amplitudes de tamanho de partícula variáveis em função do sistema de classificação adotado. Na classificação norte-americana, areia possui partícula com diâmetro entre 0,05 e 2,00 mm, silte entre 0,002 e 0,05 mm, enquanto argila apresenta partículas com menos de 0,002 mm em diâmetro (USDA, 1983).

Os solos amazônicos apresentam, em geral, textura argilosa (mais de 35% das partículas constituídas da fração argila), baixa permeabilidade e alta capacidade de retenção de água. Destacam-se na região os Latossolos Amarelos de textura argilosa, cuja exploração desordenada pode levar a acentuadas quedas na produtividade florestal (SOUZA et al., 2004).

A densidade do solo, um atributo que reflete o arranjo das partículas do solo, representa a massa por unidade de volume do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ) (BRADY; WEIL, 2008). Chancellor (1977) considera a densidade como a medição quantitativa mais direta da compactação. Essa propriedade é afetada por práticas florestais, com destaque para a exploração florestal e o transporte de madeira por máquinas e implementos de grande porte, que alteram a estrutura e, por consequência, o arranjo e volume dos poros (KLEIN, 2008).

Em relação à porosidade do solo, Klein (2008) relata a importância da existência de ar no espaço poroso do solo para evitar deficiência na aeração do sistema radicular das plantas. Em áreas florestais tropicais, a redução na porosidade do solo pela compactação pode comprometer o crescimento das plantas diante da redução na disponibilidade de oxigênio no solo (SEIXAS, 2002). Além do mais, a umidade no momento em que o solo está sendo compactado tem grande influência na redução e na redistribuição do espaço poroso (EAVIS, 1972). Segundo o autor, solos secos são mais resistentes a mudanças na distribuição do tamanho dos poros e essa resistência reduz-se com o aumento do conteúdo de água.

### 2.2.1.1 Compactação e resistência do solo a penetração

A compactação é o processo pelo qual as partículas do solo e agregados são rearranjados, tendo esses últimos suas formas e tamanhos alterados (SÁ, 2005). Do ponto de vista da exploração florestal, a compactação é uma consequência indesejada da mecanização, que reduz a produtividade biológica do solo e, em casos extremos, o torna inadequado ao crescimento das plantas (SEIXAS, 2002; REICHERT et al., 2007).

O efeito da compactação do solo no desenvolvimento das plantas é percebido quando a raiz encontra resistência mecânica ao crescimento (RIBEIRO et al., 2006; LOPES et al., 2011). Segundo Camargo (1983), esse impedimento ocorre quando o diâmetro da raiz é superior ao poro no solo. Se a raiz não romper esse impedimento, todo o sistema radicular ficará confinado na camada mais superficial do solo, deixando as raízes mais grossas e lignificadas, condição esta que limita e dificulta o aporte e absorção de nutrientes, com consequente reflexo no crescimento e no desenvolvimento das plantas.

A maior resistência do solo pode resultar em um sistema radicular ocupando menor volume de solo; porém, isto não significa necessariamente que o crescimento da planta será menor. Se o suprimento de água, ar e nutrientes for o suficiente e o comprimento das raízes atender à demanda da planta, o seu crescimento não deverá ser prejudicado (SEIXAS, 2002). Uma alta compactação do solo tende a reduzir a disponibilidade de nutrientes por causa da restrição ao desenvolvimento das raízes e do dano ao mecanismo de transporte dentro da matriz do solo (ARNUP, 1998). A grande dificuldade é determinar a real influência da compactação do solo, após a exploração da madeira, em termos de queda da produtividade florestal (GREACEN; SANDS, 1980).

A medida da resistência do solo a penetração (RP) é muito importante em termos de compactação do solo decorrente da exploração florestal. De Maria et al. (1999) concluíram que a RP apresentou melhores resultados do que a densidade do solo na caracterização da compactação entre camadas de um Latossolo Roxo distrófico muito argiloso. Streck et al. (2004), avaliando a compactação do solo pela porosidade, densidade e resistência a penetração, verificaram que a RP melhor evidenciou o efeito do tráfego de máquinas sobre o solo da floresta.

Porém, como a resistência a penetração depende da umidade (KLEIN et al., 1998) e da densidade do solo (PABIN et al., 1998), é difícil determinar valores ou faixas de valores de RP críticos ou restritivos, sendo mais fácil a obtenção desses

valores para a densidade do solo, por exemplo (REICHERT et al., 2007). Sabe-se que os níveis críticos de resistência do solo a penetração para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo, clima e espécies vegetais (MATERECHERA et al., 1991). Contudo, para fins práticos, considera-se o valor de resistência a penetração de 3,0 MPa, para espécies arbóreas, a partir do qual começa a haver restrições ao crescimento radicular, limitando a absorção de água e nutrientes, com conseqüente redução do crescimento e produtividade (USDA, 1993).

Para avaliar a resistência mecânica do solo a penetração, Stolf et al. (1983) propuseram a utilização de um penetrômetro de impacto, cujas vantagens incluem o menor custo, a não necessidade de calibração e a robustez do equipamento, que facilita o uso no campo. Segundo Vaz et al. (2002), o penetrômetro de impacto apresenta baixo custo e pode ser usado em solos de alta resistência (baixa umidade e alto teor de argila) e em solos pedregosos. Assim, esses autores sugerem a utilização do penetrômetro de impacto para avaliação rápida do nível de compactação ao longo do perfil do solo, pela praticidade e eficiência no processo de coleta de dados.

### **2.2.2 Atributos químicos de solos da Amazônia**

Os solos tropicais são, em geral, altamente intemperizados e profundos e, assim, intrinsecamente pobres em nutrientes originados da rocha matriz (BARROS; COMERFORD, 2002). A maior parte do carbono e dos nutrientes essenciais está fixada na vegetação viva e morta (serapilheira) (CERRI et al., 2008), que exerce grande influência sobre o conteúdo de nutrientes disponíveis no solo (SÁNCHEZ, 1976). Como o ciclo de nutrientes entre a floresta e o solo é quase fechado (LONGO; ESPINDOLA, 2000), a constante decomposição do material orgânico permite o desenvolvimento de uma floresta rica, sem sintomas de deficiências nutricionais, em solos com baixa fertilidade natural (DEMATTÊ, 1988).

Em termos de exploração florestal, a grande preocupação está relacionada às perdas potenciais de nutrientes em virtude da remoção ou redistribuição de materiais do solo, à taxa de reposição dessas perdas e ao efeito na produtividade florestal ao longo do tempo (ARNUP, 1998). Essas relações são complexas e não são totalmente conhecidas (ARCHIBALD et al., 1997). Para entender o efeito de retirada de árvores, Ferreira et al. (2006) realizaram um estudo em área de floresta de terra firme na Amazônia central submetida à extração seletiva de madeira ( $34 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) e verificaram que os teores de

potássio, cálcio, magnésio e sódio mostraram diferenças significativas entre os tratamentos com e sem exploração florestal.

Em relação ao teor de fósforo disponível no solo, nutriente mais complexo em termos de fertilidade de solos florestais, Sanchez e Logan (1992) relatam que mais de 90% dos solos tropicais e subtropicais apresentam deficiência nesse nutriente. Seu estoque no solo depende do material de origem, do grau de intemperismo, das características químicas, físicas e biológicas do solo, bem como da vegetação que utiliza esse nutriente e do teor de matéria orgânica do solo (SANTOS et al., 2008).

A susceptibilidade dos solos à compactação está relacionada ao seu conteúdo de matéria orgânica (MO), sendo um indicador chave da qualidade do solo (MIELNICZUK, 2008). Segundo o autor, a maioria dos atributos do solo e do ambiente relacionados às funções básicas do solo tem estreita relação com a MO, dentre eles, a resistência à erosão, a estabilidade dos agregados e da estrutura, a lixiviação de nutrientes e a infiltração e retenção de água.

Quanto maior o teor de matéria orgânica no solo, mais dificilmente esse solo é compactado (ARNUP, 1998). Além disso, a umidade do solo interage com o conteúdo de matéria orgânica para determinar a resistência do solo à compactação. A matéria orgânica aumenta mais a resistência à compactação em solos úmidos do que em solos mais secos (SOANE, 1990).

A questão central do uso da matéria orgânica como indicador de sustentabilidade de um sistema florestal está na definição do teor crítico, a partir do qual a qualidade do solo fica comprometida (MIELNICZUK, 2008). O teor crítico será variável de solo para solo; porém, de acordo com o autor, em regiões tropicais e subtropicais, o teor de carbono no solo em seu estado natural estável talvez possa ser tomado como referência. Além do mais, o declínio de MO no solo, ao longo do tempo, indicará algum erro no manejo empregado. Contudo, para fins de avaliação da fertilidade do solo considera-se valores entre 3 e 5% de matéria orgânica como alto ou adequados e valores menores que 2,5% como baixos para a manutenção da qualidade físico-química do solo.

Outro elemento de fundamental importância no solo da floresta Amazônica é o carbono (CERRI et al., 2008). O solo é um dos compartimentos que mais armazenam carbono (C) na Terra, de modo que, em termos globais, os primeiros 100 cm do solo armazenam 2,5 vezes mais C que a vegetação terrestre e duas vezes mais C que o presente na atmosfera (LAL, 2002). Portanto, o solo é um dos condicionantes de

processos poluentes do ar, tendo em vista que a variação no estoque de C regula os teores desse elemento emitidos para a atmosfera (RANGEL; SILVA, 2007).

As estimativas dos estoques de carbono orgânico em solos da Amazônia apresentam variações e incertezas (SALIMON et al., 2007), com valores entre 73 e 98 Mg ha<sup>-1</sup>, nos primeiros 100 cm de profundidade (BERNOUX, 1998) e entre 20 e 150 Mg ha<sup>-1</sup> nos primeiros 20 cm (CERRI et al., 2007). Ainda segundo Cerri et al. (2007), essa alta heterogeneidade nos resultados ocorre devido a variações na densidade dos solos, nas escalas das bases de dados, nos métodos de cálculos, na variabilidade espacial e temporal dos teores de carbono, além de diferenças na rocha matriz, profundidade do solo e microclima, em escala local (USUGA et al., 2010).

### **2.3 SERAPILHEIRA**

A formação da serapilheira em ecossistemas florestais é dada pelos resíduos orgânicos (folhas, flores, frutos, gravetos, galhos) que caem sobre o solo, exercendo um papel importante na ciclagem dos nutrientes (BARBOSA et al., 2002). Essa última, segundo os autores, é acelerada pela alta concentração de raízes de árvores na superfície do solo, pelas altas temperaturas e pela atividade dos microrganismos que vivem na superfície do solo. Dentre esses, destacam-se os fungos e bactérias, classificados como principais agentes decompositores.

O conhecimento a respeito do estoque de serapilheira em áreas de manejo florestal na Amazônia é fundamental, pois trata-se da principal forma de adição de material orgânico e nutrientes ao solo da floresta (SILVA, 1984; CUNHA et al., 1983; FERREIRA et al., 2007; HIRAI, 2008). A serapilheira é a principal via de transferência de C, N, P e Ca; enquanto K e Mg provém tanto da fase mineral, dependendo do tipo de rocha formadora do solo, como também da matéria orgânica (COLE; RAPP, 1980). Apesar de sua importância, há relativamente poucos estudos dedicados ao conhecimento da dinâmica da serapilheira em áreas manejadas na floresta Amazônica (CERRI et al., 2008). Segundo esses autores, as taxas e os padrões de decomposição são determinados pela qualidade da serapilheira, ambiente físico e pela abundância e composição dos organismos decompositores.

Segundo Cuevas e Medina (1986), a quantidade e a qualidade dos nutrientes fornecidos ao solo pela deposição da serapilheira variam, dependendo, principalmente, da composição de espécies florestais e da disponibilidade de nutrientes no solo. De

acordo com esses autores, a vegetação natural é adaptada aos suprimentos nutricionais existentes no solo, apresentando, dessa maneira, uma eficiência variável de uso para cada nutriente.

Para Martins e Rodrigues (1999), fatores como temperatura, umidade do solo e disponibilidade de nutrientes estão sujeitos a alterações em decorrência da quantidade de serapilheira depositada, afetando conseqüentemente, a germinação e o estabelecimento de plântulas. A presença de serapilheira nos tratamentos submetidos à exploração, segundo os autores, melhora as condições para germinação de sementes e sobrevivência de plântulas, ao proteger o solo da insolação direta e da erosão.

Em área de floresta de terra firme sob manejo florestal no Pará, Hirai (2008) registrou redução da quantidade de serapilheira total no decorrer dos anos pós-exploração. Em seu estudo, o efeito da extração seletiva de madeira na serapilheira se refere, portanto, a uma alta redistribuição do carbono e adição de material orgânico novo.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

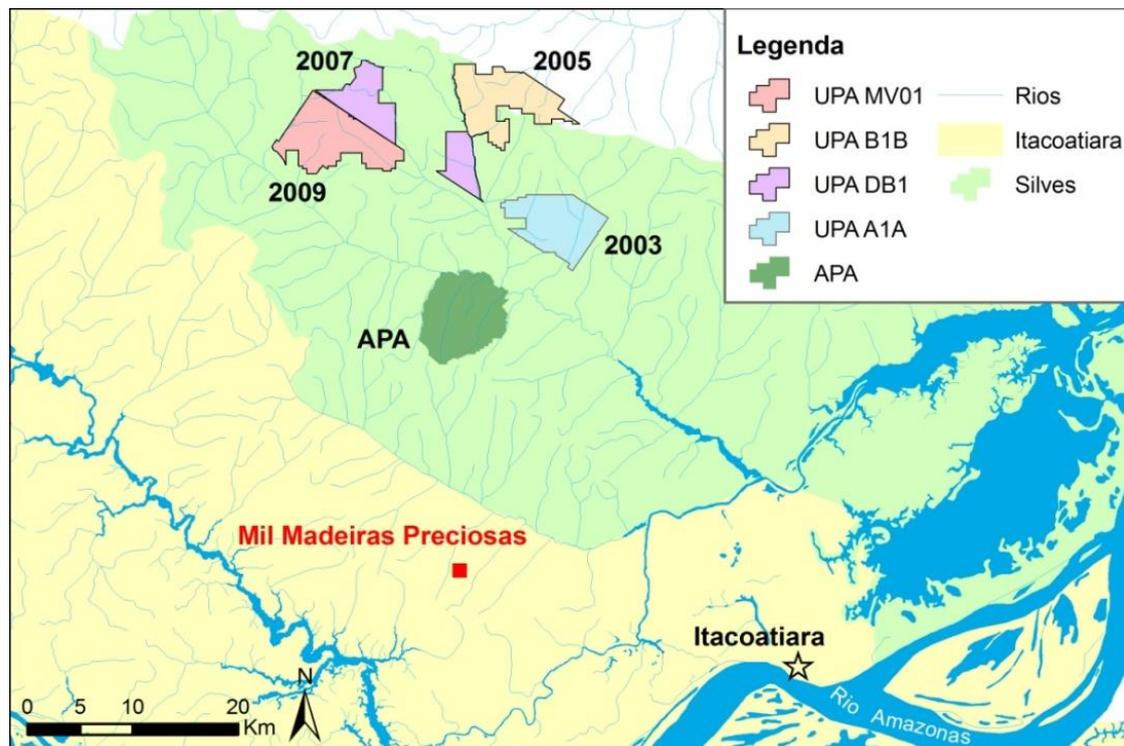
#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

O trabalho foi desenvolvido em área de exploração florestal pertencente à empresa Mil Madeiras Preciosas Ltda. (*Precious Woods Amazon*), com sede localizada no município de Itacoatiara e área de manejo florestal no município de Silves, Estado do Amazonas. A área de manejo florestal da empresa está localizada entre as latitudes 2° 43' e 3° 07' S e as longitudes 58° 31' e 58° 57' W (FIGURA 1). São no total 149.629,80 ha, sendo que 100.307,97 ha (67%) totalizam a área de efetivo manejo florestal (PRECIOUS WOODS AMAZON, 2011).

O clima da região está classificado, segundo Köppen, como grupo climático A (Clima Tropical Chuvoso), abrangendo o tipo e variedade climática Amw (chuvas do tipo monções). A precipitação média anual é de 2.200 mm, com menor volume mensal entre os meses de agosto e outubro. A temperatura média anual é 26 °C e a umidade relativa do ar média é 80% (VIEIRA; SANTOS, 1987).

A tipologia florestal predominante é a floresta de terra firme, com algumas manchas de campinarana e igapó (PRECIOUS WOODS AMAZON, 2011). De acordo com IBGE (1992), a floresta da área de estudo classifica-se como Floresta Ombrófila

Densa ligada aos fatores climáticos tropicais de altas temperaturas e alta precipitação bem distribuída durante o ano.



**FIGURA 1.** Mapa de localização da área de manejo florestal com cada UPA (Unidade de Produção Anual) e APA (Área de Proteção Absoluta) estudada na empresa Mil Madeiras Preciosas, Estado do Amazonas. Os anos referem-se à exploração florestal de cada UPA e Mil Madeiras Preciosas, em vermelho, representa a localização da sede da empresa.

Os solos de maior ocorrência estão classificados no grupo dos Latossolos Amarelos Distróficos típicos (EMBRAPA, 2009). Esse tipo de solo, em especial os distróficos típicos, são solos de evolução muito avançada, com baixa saturação por bases ( $V < 50\%$ ) e matiz amarelo (5YR) na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (EMBRAPA, 2006). Segundo dados do projeto RADAMBRASIL (1978), a área está inserida na microrregião do Médio Amazonas, com baixa fertilidade natural, alta toxidez de alumínio e solos de textura argilosa.

### 3.2 SISTEMA DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL

O manejo florestal realizado pela Mil Madeiras Preciosas baseia-se no Sistema Celos de manejo, adequado à realidade da Amazônia (PRECIOUS WOODS AMAZON,

2011). Trata-se de um sistema policíclico, caracterizado pela exploração florestal de baixo impacto baseado na regeneração natural, ou seja, não é feito nenhum tipo de enriquecimento, garantindo fornecimento de matéria-prima em um longo prazo (WERGER, 2011). A exploração florestal nessa área de manejo, iniciada em 1995, é feita por períodos, em unidades menores chamadas de UPA (Unidade de Produção Anual). A empresa só voltará a explorar cada UPA após 35 anos, ou seja, o ciclo de corte é de 35 anos (PRECIOUS WOODS AMAZON, 2011).

A intensidade média de corte da empresa é de 17 m<sup>3</sup> de madeira por hectare de floresta por ano, de acordo com a categoria PMFS Pleno (BRASIL, 2006). Em média, apenas 17% das árvores comerciais inventariadas são realmente exploradas (PRECIOUS WOODS AMAZON, 2011).

As árvores exploradas são seccionadas em toras que são envolvidas por um cabo de aço e guinchada por um trator de esteira (modelos D6 e D4) equipado com sistema mecânico de guincho via cabo, com cerca de 50 m de comprimento, até a trilha de arraste. Esse procedimento, chamado de pré-arraste, é um diferencial da empresa e objetiva minimizar a compactação do solo da floresta. Em seguida, as toras são arrastadas pelo trator *skidder* de pneus, que transita apenas nas trilhas de arraste abertas previamente (durante planejamento ou antes do pré-arraste) pelo trator de esteira D6 equipado com lâmina frontal (KG). Todas as toras são empilhadas no fundo dos pátios, paralelamente às estradas, em dois grandes feixes: um com toras de menor comprimento e outro com toras de maior comprimento. Essa disposição visa a facilitar a identificação e o manuseio (PRECIOUS WOODS AMAZON, 2011).

Quando o comprimento do fuste explorado é superior ao limite (20 metros) suportado pelos caminhões de transporte, a tora é seccionada antes da sua medição (uma tora de 12,5 m e uma tora extra) e recebe uma numeração sequencial (A, B, C) (PRECIOUS WOODS AMAZON, 2011). A numeração que acompanha a tora é vinculada ao número da árvore que a originou.

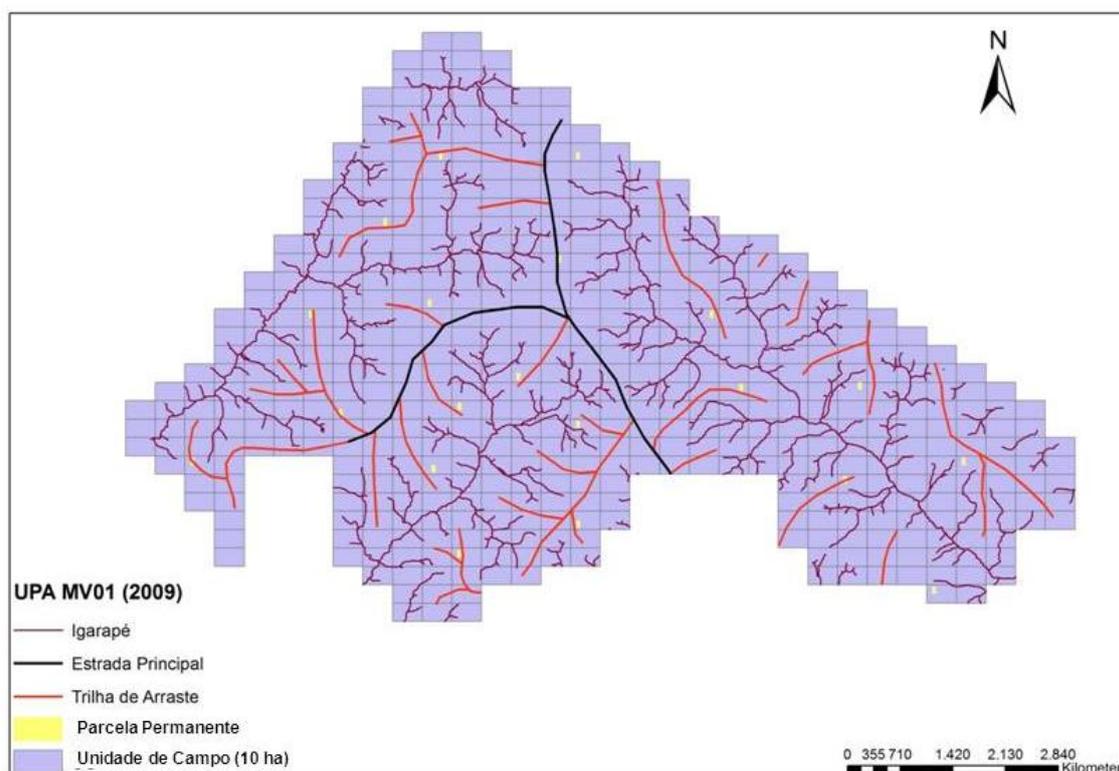
Por último, as toras são transportadas da floresta até a serraria da própria empresa. A madeira serrada se transforma em produtos semiacabados e acabados, em que 60% são destinados ao mercado interno e 40% são exportados, tendo como principal cliente o mercado Europeu (PRECIOUS WOODS AMAZON, 2011).

### 3.3 AMOSTRAGEM E OBTENÇÃO DOS DADOS

#### 3.3.1 Delimitação da área de estudo

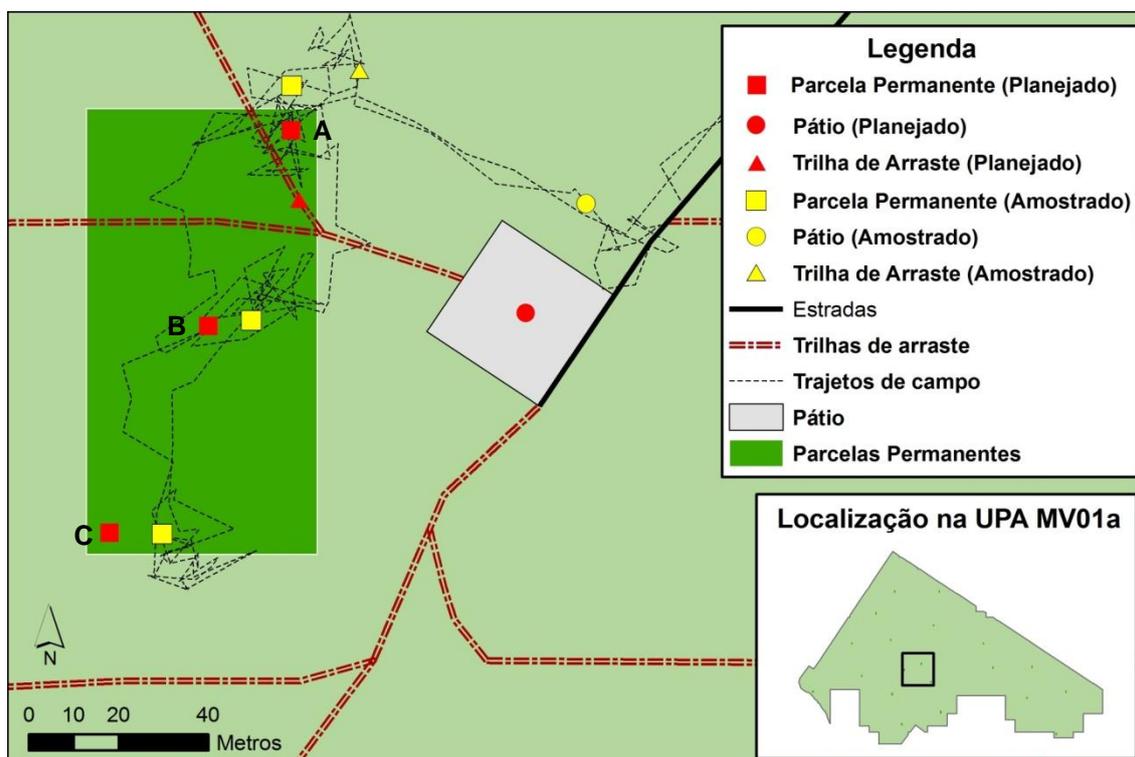
A coleta de dados foi realizada durante o mês fevereiro de 2012, período chuvoso na Amazônia. A temperatura média do ar durante a coleta dos dados foi de 27,8 °C, com 86% de umidade relativa do ar, ambos medidos com o termômetro de globo. Foram coletados dados em quatro Unidades de Produção Anual (UPA) exploradas na mesma estação do ano (de junho a novembro) em quatro anos distintos, sendo elas: UPA A1A – explorada em 2003; UPA B1B – explorada em 2005; UPA DB1 – explorada em 2007; e UPA MV01 – explorada em 2009.

Na Figura 2 está apresentada a UPA MV01 (2009), com indicação da localização da estrada principal, trilhas de arraste utilizadas pelo *skidder* e parcelas permanentes alocadas na UPA. As parcelas permanentes foram estabelecidas aleatoriamente pela equipe de inventário da empresa para estudo de dinâmica da vegetação arbórea.



**FIGURA 2.** Mapa da UPA MV01 (explorada em 2009) com a localização de estradas, trilhas de arraste, cursos d'água e parcelas permanentes (amarelo) na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

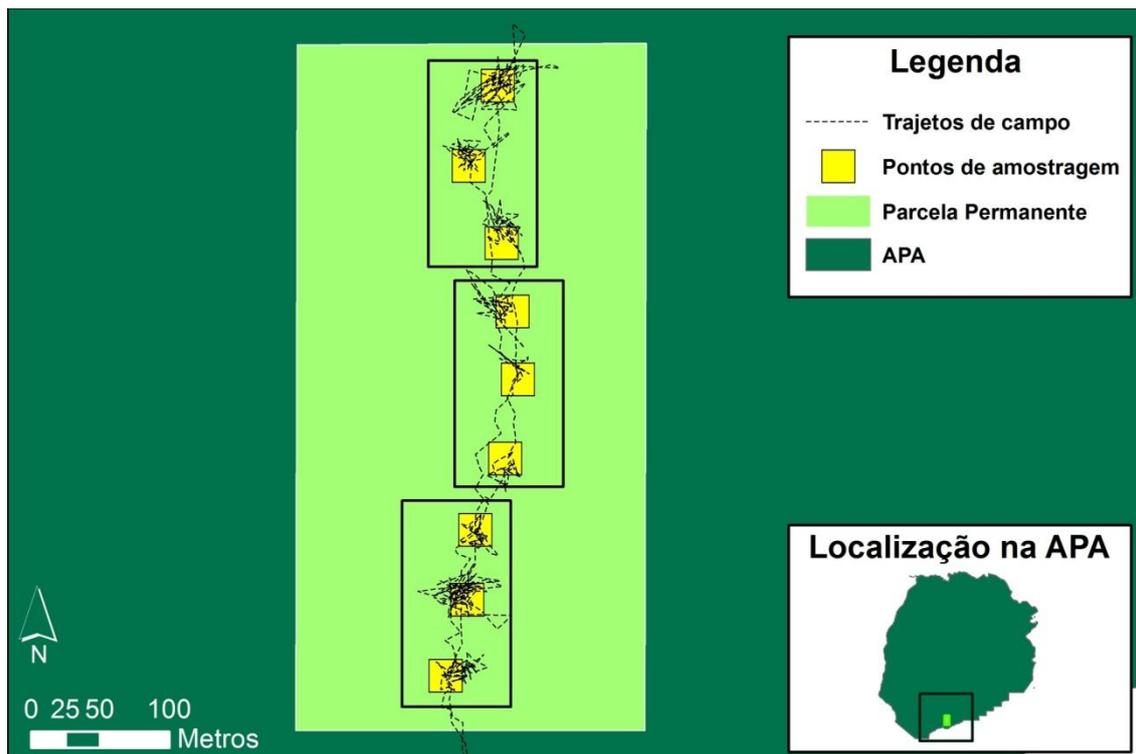
Neste estudo, três parcelas permanentes (100 m x 50 m) foram amostradas em cada UPA, escolhidas de forma sistemática de acordo com a maior proximidade da estrada principal, visando minimizar o tempo de deslocamento até cada parcela (FIGURA 2). Cada parcela foi georreferenciada com GPS (GPSMAP 62s da marca Garmin). Foram coletados dados em três pontos (A, B e C) dentro de cada parcela, sendo o ponto A estabelecido no canto inferior da parcela, o B no centro e o C no canto superior da parcela, formando uma diagonal no retângulo de 100 m x 50 m (FIGURA 3).



**FIGURA 3.** Mapa de localização de parcela permanente estudada na UPA MV01 (2009), Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. Os pontos vermelhos referem-se ao planejamento da amostragem e os pretos referem-se aos pontos coletados com GPS, em campo.

Além disso, próximo à cada parcela amostrada, foram coletados dados em uma trilha de arraste e em um pátio de estocagem de madeira (FIGURA 3). Sendo assim, em cada UPA foram coletados dados em três parcelas permanentes, três trilhas de arraste e três pátios de estocagem de madeira. No total, foram amostradas quatro UPAs, 12 parcelas permanentes (36 pontos amostrais), 12 trilhas de arraste e 12 pátios de estocagem.

Foi também amostrado o maior fragmento de Área de Proteção Absoluta (APA) da Mil Madeiras Preciosas, considerado como controle. A APA é uma área correspondente a 5% da área de manejo florestal além da APP, poupada de qualquer atividade impactante (PRECIOUS WOODS AMAZON, 2011). Como essa APA apresentava somente uma parcela de 500 m x 100 m, a coleta de dados foi realizada em nove pontos distantes 50 m entre si, ao longo do centro da parcela, conforme observado na Figura 4. Assim, cada grupo de três pontos foi considerado uma parcela da APA.



**FIGURA 4.** Mapa de localização dos pontos amostrados (marcados com GPS) na parcela permanente do fragmento de APA estudado na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

Observa-se na Figura 4 a dificuldade de se locomover em linha reta, perfeitamente, dentro de uma floresta densa, já que os pontos obtidos pelo GPS apresentam certa curva ao longo do comprimento da parcela.

### 3.3.2 Histórico da Exploração Florestal nas UPAs estudadas

Os valores referentes à área total, área de efetivo manejo e volume médio de madeira explorado em cada UPA estudada, fornecidos pela empresa, estão apresentados na Tabela 1. As áreas de efetivo manejo florestal variaram entre as UPAs. A UPA

MV01 (2009) apresentou a maior área de efetivo manejo (> 4.000 ha) e o segundo menor valor percentual em relação à área total (81%). Por outro lado, a UPA A1A (2003) apresentou a menor área de efetivo manejo (3.151 ha) e o segundo maior percentual de área explorada (85%).

**TABELA 1** - Histórico da exploração florestal das UPAs estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

UPA	ANO	Área total (ha)	Área efetivo manejo (ha)	Abrangência (%)	Volume autorizado (m <sup>3</sup> )	Volume produzido (m <sup>3</sup> )	m <sup>3</sup> /ha
A1A	2003	3.705,93	3.151,40	85,05	88.328,81	38.259,2	12,14
B1B	2005	4.622,91	3.646,36	78,88	140.650,32	63.345,96	17,37
D1B	2007	3.463,64	3.321,26	95,89	107.960,04	44.970,20	13,54
MV01	2009	5.020,99	4.070,43	81,07	121.472,74	77.749,26	19,10

As intensidades de exploração também variaram entre as UPAs, seguindo as respectivas variações na área de efetivo manejo. A UPA MV01 (2009), com a maior área de manejo, apresentou a maior intensidade de exploração florestal (19,1 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>). Da mesma maneira, o menor volume médio de madeira por hectare foi explorado na UPA A1A, com a menor área de efetivo manejo florestal (TABELA 1).

### 3.3.3 Amostragem da serapilheira

Em cada ponto de amostragem nas parcelas permanentes estudadas (UPA e APA) foi estabelecida uma subparcela de 0,5 m x 0,5 m, com o auxílio de duas trenas (FIGURA 5). Todo o material orgânico sobre o solo, em diferentes estágios de decomposição, contido nessa subparcela foi coletado manualmente e armazenado em saco plástico. Foram coletadas 45 amostras de serapilheira (3 pontos por parcela x 3 parcelas por área x 5 áreas).



**FIGURA 5.** Parcela permanente da UPA MV01 (2009). A) Aspecto visual da árvore marcada para medição do diâmetro durante o inventário florestal realizado periodicamente. B) Subparcela de 0,5 m x 0,5 m lançada em cada ponto de amostragem para coleta das amostras de serapilheira nas UPAs e APA estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

Primeiramente, as amostras foram pesadas em balança de precisão para obtenção do peso da massa úmida (g) e, em seguida, foram secas ao ar livre durante o período de trabalho de campo. Posteriormente, foram levadas ao Laboratório de Tecnologia da Madeira (FAL – UnB), onde foram secas em estufa com circulação de ar a temperatura de 70 °C por quatro dias, até estabilização da massa final.

As amostras secas foram pesadas na mesma balança para determinação do peso da massa seca (g). Em seguida, foram trituradas em moinho de bola (marca Marconi) com 60 mesh e enviadas ao Laboratório Soloquímica (Brasília – DF) para as devidas análises químicas listadas no item 3.6 deste trabalho.

### 3.3.4 Amostragem do solo

#### 3.3.4.1 Avaliação da fertilidade do solo

Para avaliação da fertilidade do solo, em cada ponto de amostragem (UPA e APA) foram coletadas amostras de solo com trado tipo holandês nas profundidades 0 a 10 cm, 10 a 30 cm e 30 a 50 cm. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos com a parte superior aberta para secagem ao ar livre, sendo posteriormente enviadas ao Laboratório Soloquímica (Brasília – DF) para as análises físicas e químicas listadas nos itens 3.4 e 3.5 deste trabalho, com base nos critérios da EMBRAPA (1997).

As amostras de solo coletadas nos pontos A, B e C de cada uma das 15 parcelas, de mesma profundidade, foram misturadas para obtenção de amostra composta. As

amostras compostas foram identificadas por profundidade e parcela, totalizando 45 amostras compostas de solo (15 parcelas x 3 profundidades).

### 3.3.4.2 Densidade do solo

Para determinação da densidade do solo, foram coletadas amostras nas camadas de 0 a 10 cm, 10 a 30 cm e 30 a 50 cm, por meio do método do anel volumétrico (VALADARES et al., 2009) (FIGURA 6). As amostras foram armazenadas em sacos plásticos e mantidas fechadas dentro de isopor para evitar perda de umidade. Em seguida, foram pesadas em balança de precisão para obter o peso da massa úmida (g).



**FIGURA 6.** Coleta de amostra de solo em ponto de amostragem pelo método do anel volumétrico. A) Inserção do anel volumétrico no solo na camada de 30 a 50 cm. B) Anel volumétrico retirado com a amostra solo, na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

Após o período de trabalho de campo (15 dias), essas amostras foram secas em estufa a 103 °C por 48 horas no Laboratório de Tecnologia da Madeira (DEF – UnB). Em seguida, foram pesadas na mesma balança de precisão para determinação do peso da massa seca (g).

### 3.3.4.3 Resistência do solo a penetração (RP)

Para medida de RP utilizou-se o penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, cuja massa de impacto de 4 kg sofreu queda livre de 20,0 cm. A leitura da penetração foi feita na própria haste, graduada em centímetros (STOLF et al., 1983). Registrou-se o número de golpes (quedas livres) até 50 cm de profundidade (FIGURA 7).

As medidas foram tomadas em cada ponto amostrado nas parcelas permanentes das UPA e APA, em um total de 45 pontos (3 pontos x 3 parcelas x 5 áreas). Mediu-se também a RP em três trilhas de arraste e três pátios de estocagem de madeira por UPA, de forma sistemática segundo maior proximidade da parcela amostrada (uma trilha e um pátio por parcela permanente), totalizando 12 trilhas e 12 pátios.



**FIGURA 7.** Coleta de dados de resistência do solo a penetração (RP). A) Penetrômetro de impacto utilizado para medição da RP. B) Processo de contagem dos golpes do penetrômetro de acordo com a profundidade, na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

As trilhas de arraste são aquelas abertas pelo trator de esteira D6 equipado com lâmina frontal. O *skidder* transita por essas trilhas (FIGURA 8) arrastando as toras para o pátio de estocagem. Em cada trilha foram registrados os dados do penetrômetro, até 50 cm de profundidade, em três pontos: centro (entre rodagem) e lateral direita e esquerda (rodagem do *skidder*) (FIGURA 8B).



**FIGURA 8.** Trilhas de arraste de toras utilizadas na exploração florestal. A) UPA A1A (2003). B) UPA MV01 (2009); com a indicação dos locais de coleta de RP: triângulo amarelo: centro da trilha; triângulos vermelhos: lateral direita e esquerda (rodagem), na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

O pátio de estocagem de madeira é uma estrutura permanente ao longo das estradas secundárias, onde é feito estoque temporário das toras após o corte. É a área mais compactada no processo de exploração florestal (FIGURA 9). Em cada pátio foi realizada a mesma amostragem em três pontos: canto inferior (local de empilhamento das toras e mais próximo à estrada), centro (área de circulação da empilhadeira) e canto superior (área de circulação do *skidder* com e sem toras).



**FIGURA 9.** Pátios de estocagem de madeira na área de manejo florestal. A) UPA A1A (2003). B) UPA MV01 (2009), na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

### 3.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

As propriedades físicas estudadas foram granulometria, densidade do solo, resistência do solo a penetração, porosidade total e umidade atual do solo. Todas as propriedades foram determinadas segundo preconizado por EMBRAPA (1997).

#### 3.4.1 Granulometria

A quantidade proporcional de areia, argila e silte, em  $g\ kg^{-1}$ , foi determinada pela análise granulométrica das amostras compostas de solo (EMBRAPA, 1997). A textura do solo foi determinada pelo método do triângulo textural baseado na

classificação Norte-americana (USDA, 1993). De acordo com esse método, foi possível traçar as perpendiculares no triângulo, conforme os teores de argila, areia e silte obtidos pela análise granulométrica.

### 3.4.2 Densidade do solo (Ds)

A densidade do solo, em base seca, foi determinada por meio do método do anel volumétrico (77,72 cm<sup>3</sup>), usando a seguinte fórmula (EMBRAPA, 1997):

$$D_s = \frac{P_s}{V} \quad (1)$$

Onde: D<sub>s</sub> = densidade aparente do solo (g cm<sup>-3</sup>); P<sub>s</sub> = peso da massa seca a 105 °C (g); V = volume do solo contido no anel (cm<sup>3</sup>).

### 3.4.3 Porosidade total (Pt)

A porosidade foi calculada assumindo que a densidade de partículas de solos minerais para as condições brasileiras é de 2,65 g cm<sup>-3</sup>. Segundo Elliot et al. (1999), esse valor de densidade é apropriado para muitos tipos de solo, exceto para os derivados vulcânicos.

$$P_t = 1 - \frac{D_s}{D_p} \times 100 \quad (2)$$

Onde: P<sub>t</sub> = porosidade total (%); D<sub>s</sub> = densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>); D<sub>p</sub> = densidade das partículas minerais do solo (2,65 g cm<sup>-3</sup>).

### 3.4.4 Umidade volumétrica (Uv)

Para determinação do teor de umidade volumétrica do solo (%) foram usados os valores de massa úmida e seca das amostras (g). O cálculo da umidade na base seca foi feito pela equação (FRIGHETTO; VALARINI, 2000):

$$U_v = \frac{P_u - P_s \times 100}{V} \quad (3)$$

Onde: U<sub>v</sub> = umidade volumétrica (%); P<sub>u</sub> = peso úmido da amostra de solo (g); P<sub>s</sub> = peso seco da amostra de solo (g); V = volume do anel volumétrico (77,72 cm<sup>3</sup>).

### 3.4.5. Resistência do solo a penetração (RP)

Os resultados obtidos em impactos  $\text{dm}^{-1}$ , a partir do número de golpes registrados para cada camada do solo, foram convertidos para RP por meio da equação proposta por Stolf (1991), modificada para a altura de queda de 20,0 cm e área de ponteira de 1,27  $\text{cm}^2$ :

$$\text{RP} = 5,67 + 3,43 * \text{N} \quad (4)$$

Onde: RP = resistência do solo a penetração ( $\text{kgf cm}^{-2}$ ); N = número de impactos para atingir 5 cm de profundidade no solo ( $\text{impactos dm}^{-1}$ ).

Em seguida, os valores de RP foram convertidos para a unidade MPa (mega pascal) multiplicando-se o resultado obtido em  $\text{kgf cm}^{-2}$  pela constante 0,098 (STOLF, 1991).

## 3.5 PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO

### 3.5.1 Avaliação da acidez e fertilidade do solo

As análises realizadas em laboratório, segundo EMBRAPA (1997), determinaram os valores dos seguintes atributos químicos das amostras de solo coletadas no presente trabalho:

- pH em  $\text{H}_2\text{O}$ ;
- fósforo disponível (P,  $\text{mg dm}^{-3}$ ), cálcio trocável ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), magnésio trocável ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), potássio disponível (K,  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), alumínio trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ), sódio (Na,  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) e enxofre (S,  $\text{mg dm}^{-3}$ );
- acidez potencial (H+Al,  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ );
- soma das bases (S,  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ );
- capacidade de troca de cátion a pH 7 (CTC,  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ );
- saturação por bases (V, %) e por alumínio (m, %);
- carbono orgânico (CO,  $\text{g kg}^{-1}$ );
- matéria orgânica ( $\text{MO} = \text{CO} \times 1,724$ ,  $\text{g kg}^{-1}$ ).

A classificação dos atributos químicos do solo foi realizada a partir do estudo de Tomé Júnior (1997).

### **3.5.2 Estoque de carbono orgânico (ECO)**

O estoque de carbono orgânico das amostras de solo coletadas no presente estudo foi calculado a partir dos valores de carbono orgânico (VELDKAMP, 1994; FERNANDES; FERNANDES, 2008; USUGA et al., 2010):

$$ECO = CO \times Ds \times e / 10 \quad (5)$$

Onde: ECO = estoque de carbono orgânico ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ); CO = teor de CO na camada do solo amostrada ( $g \text{ kg}^{-1}$ ); Ds = densidade do solo ( $g \text{ cm}^{-3}$ ); e = espessura da camada de solo considerada (cm).

### **3.6 BIOMASSA E PROPRIEDADES QUÍMICAS DA SERAPILHEIRA**

A partir do peso da massa seca (g) de cada amostra de serapilheira coletada nas subparcelas (0,5 m x 0,5 m), foi calculado o estoque de serapilheira ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ). As análises de laboratório determinaram os teores de nitrogênio (N,  $g \text{ kg}^{-1}$ ); fósforo (P,  $g \text{ kg}^{-1}$ ); cálcio (Ca,  $g \text{ kg}^{-1}$ ); magnésio (Mg,  $g \text{ kg}^{-1}$ ); potássio (K,  $g \text{ kg}^{-1}$ ); enxofre (S,  $g \text{ kg}^{-1}$ ); e carbono orgânico (CO,  $g \text{ kg}^{-1}$ ).

### **3.7 ANÁLISE DOS DADOS**

Foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov para verificação da normalidade de todos os dados apresentados neste trabalho pelo programa ASSISTAT versão 7,6 beta (SILVA; AZEVEDO, 2009). Transformaram-se os dados brutos que não apresentaram normalidade com o objetivo de obter a distribuição normal (SHAPIRO; WILK, 1965), utilizando-se, para tanto, a transformação do conjunto de dados pelas transformadas matemáticas, como o logaritmo na base 10.

### 3.7.1 Atributos físicos e químicos do solo

Para avaliar as possíveis diferenças nas propriedades físico-químicas dos solos foram aplicadas análises de variância com dois fatores (*two-way* ANOVA), cujos fatores foram:

- Fator 1: UPA/APA – 5 níveis (solo) e 4 níveis (RP)
- Fator 2: profundidade - 3 níveis (solo) e 10 níveis (RP)
- Tratamentos: 15 (solo) e 40 (RP)
- Repetições: 3
- Total: 45 (solo) e 120 (RP)

Em seguida, foram realizados testes de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, para comparação de médias. Esse teste é utilizado quando o número de tratamentos é alto ( $> 8$ ), separando os dados em grupos semelhantes com a mesma precisão que o teste de Tukey (SCOTT; KNOTT, 1974). Foi utilizado o programa ASSISTAT versão 7,6 beta (SILVA; AZEVEDO, 2009) para as análises mencionadas.

Além disso, foi realizado o teste de correlação de Pearson, no programa Statgraphics versão 5.1 (Statgraphics Manugistics, Rockville, MD, USA), para verificar a significância das correlações entre os atributos dos solos amostrados. O programa SigmaPlot para Windows versão 10 (Systat Software Inc.) foi utilizado para gerar os gráficos de resistência do solo a penetração ao longo das profundidades estudadas (0 a 50 cm) nas parcelas permanentes, trilhas de arraste e pátios de estocagem de madeira amostrados.

### 3.7.2 Atributos da serapilheira

Para avaliar as possíveis diferenças na biomassa da serapilheira e nos teores de nutrientes, também foram aplicadas as mesmas análises de variância (*two-way* ANOVA) e testes de médias (Scott-Knott) mencionados para as propriedades físicas e químicas do solo. Porém, os fatores considerados foram:

- Fator 1: UPA/APA – 5 níveis
- Fator 2: parcela – 3 níveis
- Tratamentos: 15
- Repetições: 3
- Total: 45

Também foi utilizado o programa ASSISTAT versão 7,6 beta (SILVA; AZEVEDO, 2009) para tais análises.

Foi realizado o teste de correlação de Pearson, no programa Statgraphics versão 5.1 (Statgraphics Manugistics, Rockville, MD, USA), para verificar a significância das correlações entre os atributos das serapilheiras amostradas.

### 3.7.3 Análises multivariadas

A análise de componentes principais (*Principal Component Analysis – PCA*) foi realizada para ordenação das áreas estudadas em relação aos principais fatores potencialmente responsáveis pela variação dos atributos físicos e químicos do solo e da serapilheira, no programa Statgraphics versão 5.1 (Statgraphics Manugistics, Rockville, MD, USA). Trata-se de uma técnica de ordenação indireta que condensa as informações provenientes das variáveis em um grupo de novas composições dimensionais (componentes), sem que a estrutura original dos dados seja distorcida (KENT; COKER, 1992). A análise de componentes principais é associada à idéia de redução de massa de dados, com menor perda possível da informação (VARELLA, 2008).

Foram realizadas duas PCAs preliminares, ambas baseadas na matriz de correlação e a partir de dados normalizados e padronizados. Foram também testadas PCAs com base na matriz de covariância, porém as PCAs com base na matriz de correlação dos dados apresentaram autovalores mais coerentes (FELFILI et al. (2011). Uma PCA foi realizada com todas as variáveis dos atributos físicos e químicos do solo e outra com as variáveis dos atributos químicos e biomassa da serapilheira. Essas análises permitiram selecionar um grupo menor de variáveis mais significativas para uso na PCA final do solo e da serapilheira, bem como na análise de agrupamentos (*Cluster analysis*).

A PCA preliminar do solo permitiu eliminar potássio (K), acidez potencial (H+Al), enxofre (S), saturação por bases (V) e sódio (Na) em virtude de seus baixos autovalores (< 1,0) (FELFILI et al., 2011), além de porosidade total (Pt) devido à sua alta correlação (-1,0) com densidade do solo. Portanto, a PCA final analisou os dados referentes a alumínio trocável ( $Al^{3+}$ ), argila, teores de cálcio e magnésio ( $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ ), CTC, densidade, estoque de carbono orgânico (ECO), matéria orgânica (MO), fósforo (P), resistência do solo a penetração (RP) e umidade volumétrica (Uv).

A PCA preliminar da serapilheira permitiu eliminar o potássio (K) devido ao baixo autovalor desse nutriente ( $< 1,0$ ). Sendo assim, na PCA final foi analisada a matriz de dados das áreas estudadas referentes ao estoque de serapilheira, cálcio (Ca), magnésio (Mg), carbono orgânico (CO), fósforo (P), enxofre (S) e nitrogênio (N).

Ambas PCAs produziram diagramas de ordenação baseados na semelhança das parcelas das UPAs e da APA em relação aos atributos físicos e químicos do solo e da serapilheira, reduzindo-as a componentes principais nos eixos de ordenação. Nesse diagrama de ordenação (*biplo*t), as médias de cada parcela foram representadas por pontos ótimos aproximados e as variáveis físicas e químicas do solo e da serapilheira foram representadas por flechas indicando a intensidade e direção de aumento, conforme realizado por Magalhães et al. (2013).

Além disso, foi realizada a análise de agrupamentos (*Cluster analysis*) com o objetivo de classificar as UPAs e a APA em grupos que compartilham as mesmas características em relação aos atributos do solo e da serapilheira analisados. Trata-se de um método numérico de classificação aplicado para análise indireta de gradiente ambiental, o qual separa grupos baseando-se em um conjunto de dados interdependentes (FELFILI et al., 2011).

Essa análise foi feita no programa FITOPAC versão 2.1 utilizando a matriz de dados composta pelas variáveis do solo e da serapilheira utilizadas nas respectivas análises de componentes principais finais. Foi utilizado o coeficiente *Bray-Curtis*, conforme sugerido para uso em análises de dados quantitativos (FELFILI et al., 2011). O método de agrupamento foi o WPGMA (agrupamento por médias ponderadas), já que foram comparadas UPAs com áreas diferentes. Além disso, utilizou-se o valor do coeficiente de correlação cofenético do agrupamento ( $r$ ) (SOKAL; ROHLF, 1962) acima de 0,7, como indicativo de uma correspondência razoável entre o dendrograma e a matriz original de dados.

## **4. RESULTADOS**

### **4.1 ATRIBUTOS FÍSICOS DOS SOLOS DA APA E DAS UPAs EXPLORADAS EM 2003, 2005, 2007 E 2009**

Ocorreu interação significativa, pela *two-way* Anova, no fator UPA em relação à porosidade total ( $F_{crit} = 4,0179$ ,  $F = 18,0034$ ,  $P < 0,001$ ), teor de argila ( $F_{crit} = 4,0179$ ,

F = 25,612, P <0,001), densidade do solo (Fcrit = 4,0179, F = 18,003, P <0,001) e umidade volumétrica (Fcrit = 4,0179, F = 19,065, P < 0,001). Para o fator profundidade, não foi verificada interação significativa (P > 0,05).

Os valores médios dos atributos físicos das amostras de solo coletadas neste estudo estão apresentados na Tabela 2. De acordo com a análise granulométrica, o solo apresentou, em média, 657,2 g kg<sup>-1</sup> de argila, sendo classificado como Latossolo Amarelo (EMBRAPA, 2009) com textura argilosa (USDA, 1993). A fração argila predominou em todas as profundidades e em todas as áreas amostradas. Seus valores mínimos e máximos foram 525,0 g kg<sup>-1</sup> (UPA A1A - 0 a 10 cm) e 800,0 g kg<sup>-1</sup> (UPA B1B - 30 a 50 cm), respectivamente.

**TABELA 2** - Atributos físicos dos solos amostrados na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si, na coluna, pelo teste de Scott-Knott (P < 0,05). Prof = profundidade; Arg = argila; Uv = umidade volumétrica; Ds = densidade do solo; Pt = porosidade total; RP = resistência do solo a penetração; CV = coeficiente de variação.

<b>UPA</b>	<b>Prof</b> cm	<b>Arg</b> g kg <sup>-1</sup>	<b>Uv</b> %	<b>Ds</b> g cm <sup>-3</sup>	<b>Pt</b> %	<b>RP</b> MPa
A1A (2003)	0 - 10	525,00 <b>b</b>	31,27 <b>b</b>	1,56 <b>c</b>	41,04 <b>a</b>	1,50 <b>a</b>
	10 - 30	583,33 <b>b</b>	32,38 <b>b</b>	1,51 <b>c</b>	42,97 <b>a</b>	2,19 <b>a</b>
	30 - 50	616,67 <b>b</b>	31,84 <b>b</b>	1,50 <b>c</b>	43,26 <b>a</b>	1,76 <b>a</b>
B1B (2005)	0 - 10	741,67 <b>a</b>	40,21 <b>a</b>	1,58 <b>c</b>	40,45 <b>a</b>	1,89 <b>a</b>
	10 - 30	741,67 <b>a</b>	38,80 <b>a</b>	1,59 <b>c</b>	39,98 <b>a</b>	2,61 <b>a</b>
	30 - 50	800,00 <b>a</b>	39,28 <b>a</b>	1,51 <b>c</b>	42,87 <b>a</b>	2,00 <b>a</b>
DB1 (2007)	0 - 10	658,33 <b>ab</b>	41,09 <b>a</b>	1,58 <b>c</b>	40,35 <b>a</b>	1,37 <b>a</b>
	10 - 30	683,33 <b>ab</b>	40,06 <b>a</b>	1,64 <b>c</b>	38,13 <b>a</b>	2,38 <b>a</b>
	30 - 50	708,33 <b>ab</b>	40,02 <b>a</b>	1,60 <b>c</b>	39,48 <b>a</b>	2,40 <b>a</b>
MV01 (2009)	0 - 10	616,67 <b>ab</b>	39,17 <b>a</b>	1,65 <b>b</b>	37,85 <b>b</b>	1,44 <b>a</b>
	10 - 30	641,67 <b>ab</b>	37,63 <b>a</b>	1,73 <b>b</b>	34,60 <b>b</b>	2,60 <b>a</b>
	30 - 50	683,33 <b>ab</b>	37,22 <b>a</b>	1,71 <b>b</b>	35,45 <b>b</b>	2,70 <b>a</b>
APA	0 - 10	600,00 <b>ab</b>	36,88 <b>a</b>	1,73 <b>a</b>	34,58 <b>c</b>	2,35 <b>a</b>
	10 - 30	608,33 <b>ab</b>	36,22 <b>a</b>	1,82 <b>a</b>	31,27 <b>c</b>	2,87 <b>a</b>
	30 - 50	650,00 <b>ab</b>	37,48 <b>a</b>	1,83 <b>a</b>	31,03 <b>c</b>	2,68 <b>a</b>
Média		657,22	37,30	1,64	38,22	2,18
Desvio padrão	0 - 50	71,12	3,16	0,11	4,02	0,50
CV (%)		6,34	16,12	4,7	12,0	18,29

Quanto às diferenças estatísticas entre o teor de argila, as UPAs exploradas em 2007, 2009 e a APA não diferiram estatisticamente entre si. Além do mais, não

apresentaram diferença significativa quando comparadas às UPAs anteriormente mencionadas (TABELA 2).

A umidade volumétrica média do solo, entre todas as áreas estudadas, foi 37,3%. Houve interação significativa entre UPAs e APA ( $P < 0,05$ ). Assim, conforme observado na Tabela 2, a umidade volumétrica média da UPA explorada em 2003 foi significativamente diferente das demais. Observou-se também que na UPA explorada em 2007 foram registrados os maiores valores médios dessa variável. Esses valores confirmam a correlação de Pearson significativa ( $P < 0,05$ ) entre o teor de argila e a umidade volumétrica (0,71).

Em relação à densidade do solo, o valor médio entre todas as áreas foi  $1,64 \text{ g cm}^{-3}$ . Os valores registrados variaram de  $1,50 \text{ g cm}^{-3}$  (A1A – 30 a 50 cm) a  $1,83 \text{ g cm}^{-3}$  (APA – 30 a 50 cm), os quais podem ser considerados altos (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Não houve interação significativa entre profundidades, parcelas e entre profundidade x UPA ( $P \geq 0,05$ ). Porém, a interação foi significativa entre UPAs e APA ( $P < 0,05$ ) (TABELA 2).

Com exceção das UPAs B1B (2005) e A1A (2003), todas as áreas estudadas apresentaram aumento no valor de densidade do solo ao longo da profundidade. Entre as áreas, os valores médios de densidade diminuíram com o aumento dos anos pós-exploração (Ds em  $2009 > 2007 > 2005 > 2003$ ). Porém, na APA, foram registrados valores de densidade do solo significativamente superiores (TABELA 2).

Em termos de porosidade total, o valor médio entre todas as áreas foi 38,2%. O valor mínimo dessa variável foi 31,0%, observado para a APA (30 - 50 cm), e o máximo foi 43,3%, para a UPA explorada em 2003 (30 - 50 cm). Esses valores são considerados altos, conforme esperado para Latossolos de textura argilosa (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Para essa variável também ocorreu interação significativa entre parcelas e entre UPAs e APA ( $P < 0,05$ ).

Como a densidade e a porosidade total são inversamente proporcionais, as áreas de menor densidade apresentaram os maiores valores de porosidade total. A APA, por exemplo, apresentou a maior densidade média e a menor porosidade total média do solo. Por outro lado, a UPA explorada em 2003 registrou a menor densidade média e a maior porosidade total média (TABELA 2).

De modo geral, a UPA explorada em 2003 apresentou os menores teores médios de argila, umidade volumétrica, densidade, bem como os valores mais baixos de RP. Por outro lado, a UPA mais recentemente explorada (2009) apresentou maiores teores

de argila e umidade, além das médias mais altas de densidade e RP dentre as UPAs. A APA, contudo, apresentou altos teores de argila, umidade volumétrica e densidade do solo, assim como valores elevados de RP (TABELA 2).

Pelos resultados da correlação de Pearson, houve correlação significativa ( $P < 0,05$ ) entre argila e umidade (0,74), densidade e RP (0,64), densidade e enxofre (-0,59), e densidade e teor de cálcio + magnésio ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ) (-0,57).

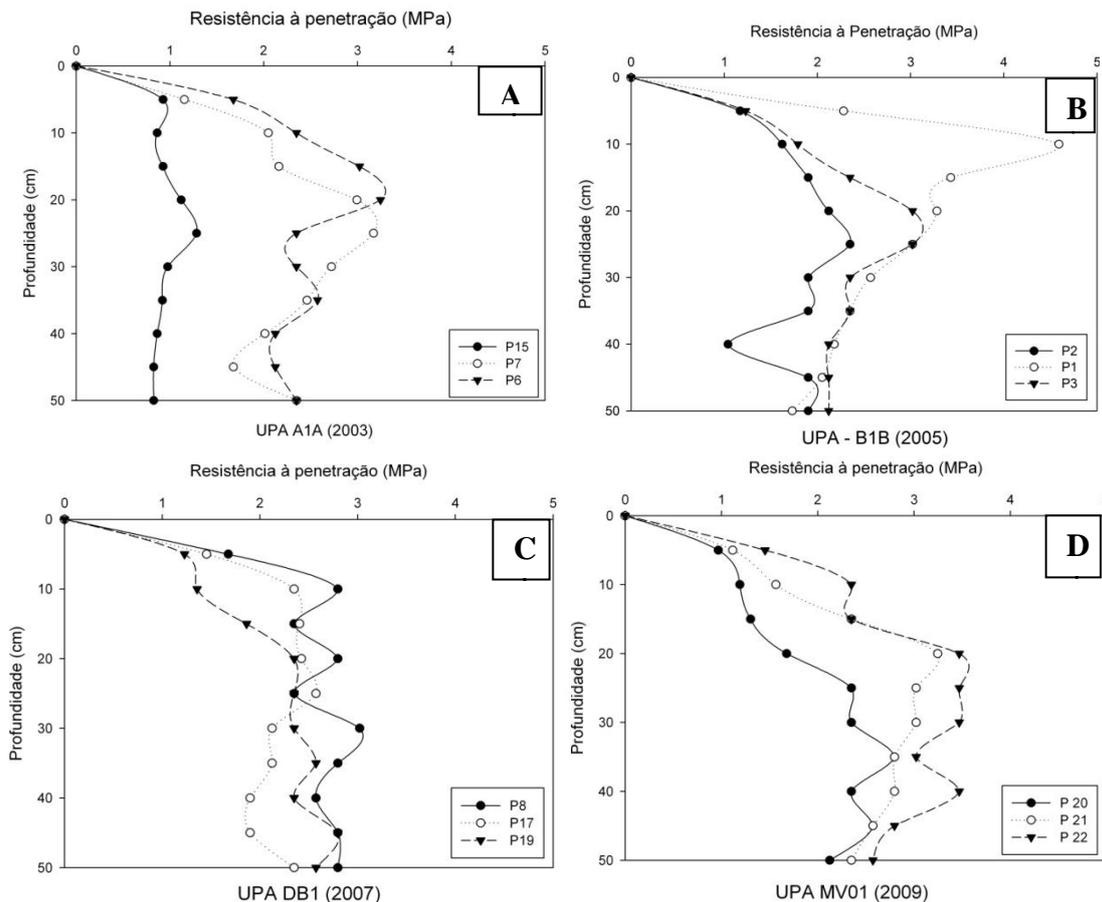
#### **4.1.1 Resistência do solo a penetração (RP)**

Em termos de RP, não foi verificada interação significativa para os fatores profundidade ( $F = 1,0468$ ) e UPA ( $F = 0,8714$ ) ( $P > 0,05$ ). Em outras palavras, não houve efeito de profundidade, parcela e UPA em relação aos dados de RP dentro das parcelas amostradas no presente estudo (TABELA 2).

Os dados apresentados na Tabela 2 dizem respeito aos valores médios de RP para as profundidades de 0 a 10 cm, 10 a 30 cm e 30 a 50 cm estudadas nas parcelas permanentes. Na Figura 10 (A - D) são apresentados os valores brutos de RP, ao longo da profundidade (0 a 50 cm), registrados nas mesmas parcelas permanentes. Observa-se que, de modo geral, houve aumento de RP ao longo da profundidade do solo.

Na UPA A1A (2003), nove anos após a exploração florestal (FIGURA 10A), valores de RP entre 0,93 MPa (P15 - 45 a 50 cm) e 3,25 MPa (P6 - 15 a 20 cm) foram registrados. Esses valores foram obtidos em solo com 31,8% de umidade e  $1,53 \text{ g cm}^{-3}$  de densidade. Pode-se observar que a parcela P15 apresentou valores de RP inferiores em todas as profundidades, por diferenças na textura do solo. Já as demais parcelas dessa UPA apresentaram curvas de RP bastante semelhantes.

Sete anos após a exploração florestal, na UPA B1B (FIGURA 10B), os valores de RP variaram de 1,17 MPa (P2 - 0 a 5 cm) a 4,79 MPa (P1 - 5 a 10 cm). Esses valores foram obtidos em solo com umidade média de 39,4% e densidade média de  $1,56 \text{ g cm}^{-3}$ . Destaca-se, nessa UPA, o valor superior a 4,0 MPa verificado na parcela 1, que pode ser explicado por uma raiz grossa ou pedra presente nessa camada do solo, dificultando a penetração do equipamento no solo durante a coleta.



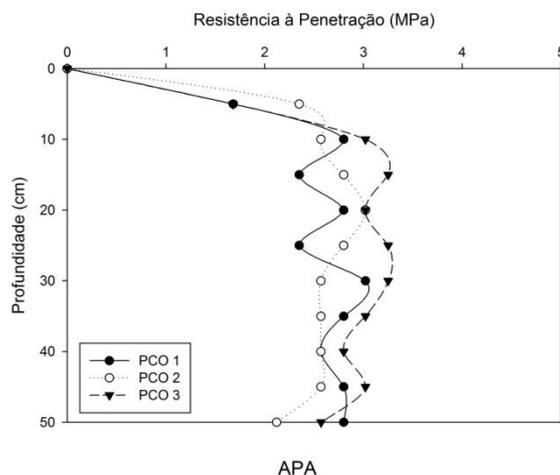
**FIGURA 10.** Resistência do solo a penetração (RP) ao longo da profundidade (0 – 50 cm) nas parcelas permanentes das UPAs estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

A UPA DB1, com cinco anos pós-exploração (FIGURA 10C), apresentou valores de RP variando de 1,23 MPa (P19 - 5 cm) a 3,02 MPa (P8 - 30 cm). A umidade média do solo nessa UPA foi 40,4%, com  $1,61 \text{ g cm}^{-3}$  de densidade média. Nessa UPA, as curvas de RP foram relativamente uniformes entre as parcelas estudadas, com a parcela P19 apresentando menores valores de RP nas camadas superficiais e a P17 menores valores nas camadas mais profundas.

Por outro lado, a UPA MV01 (2009) (FIGURA 10D), com três anos pós-exploração, apresentou valores de RP superiores às demais áreas nas primeiras profundidades estudadas. A umidade média nessa área foi 38,0%, com  $1,70 \text{ g cm}^{-3}$  de densidade média. O valor mínimo registrado foi 0,78 MPa (P20 – 0 a 5 cm) e o máximo foi 3,92 MPa (P22 – 35 a 40 cm). Destacam-se nessa área os altos valores de RP registrados na camada de 20 a 40 cm da parcela P22 (entre 3,0 e 4,0 MPa).

Na APA, conforme verificado na Figura 11, a RP variou entre 1,68 MPa (0 a 5 cm) e 3,25 MPa (25 a 30 cm de profundidade). No geral, os valores concentraram-se

entre 2,5 e 3,5 Mpa, obtidos em solo com 36,9% de umidade média e densidade média de  $1,79 \text{ g cm}^{-3}$ .



**FIGURA 11.** Resistência do solo a penetração (RP) ao longo da profundidade (0 – 50 cm) na parcela permanente da APA estudada na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

Assim, de modo geral, mesmo não diferindo significativamente das demais, as parcelas das UPAs mais recentemente exploradas apresentaram maior resistência média do solo a penetração, cujos valores foram próximos aos verificados na APA. Essa área não explorada, porém, obteve valores de RP mais uniformes ao longo da profundidade do solo, em suas três parcelas.

Os resultados da correlação de Pearson revelaram correlação significativa ( $P < 0,05$ ) entre RP e densidade (0,64), RP e estoque de carbono orgânico (0,66) e RP e enxofre (-0,56).

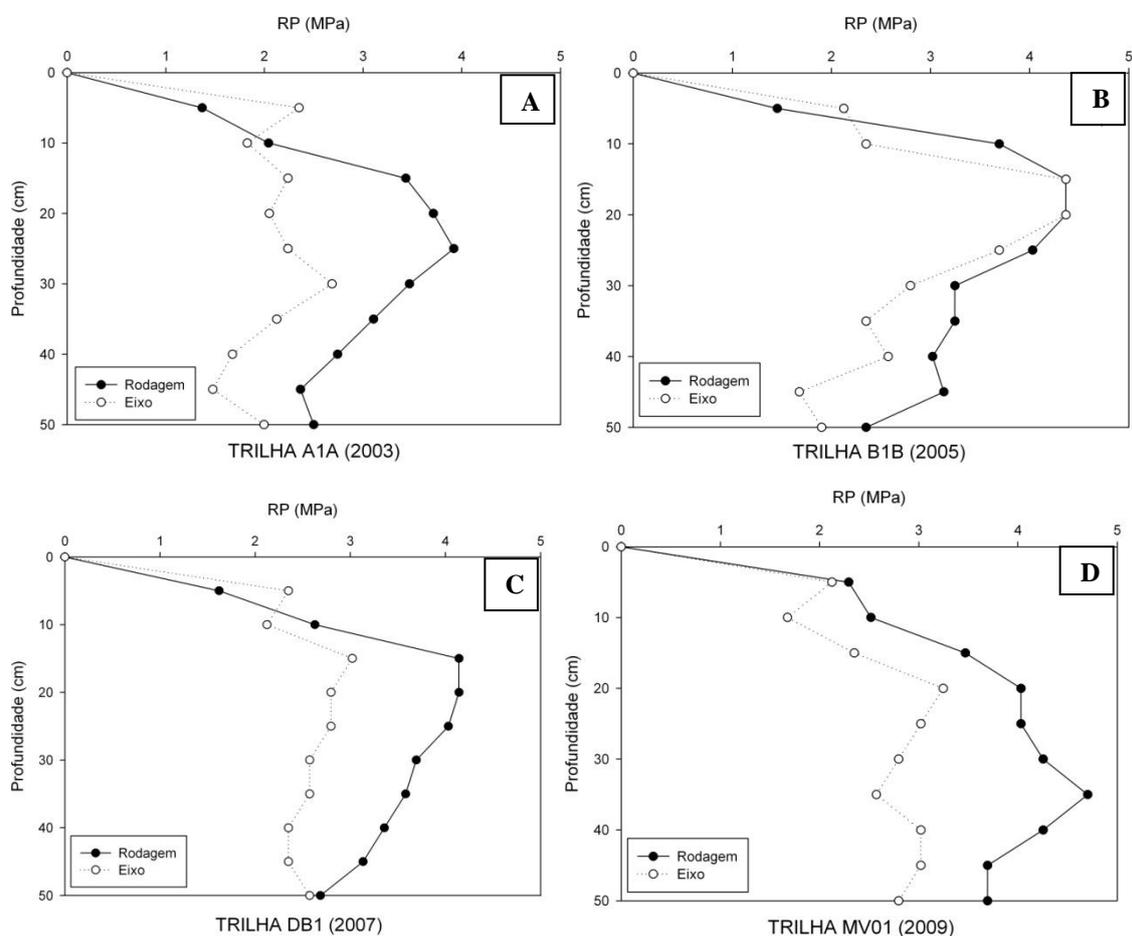
### ***Trilhas de arraste***

Nas trilhas de arraste, de modo geral, foram registrados valores de RP mais elevados em comparação aos obtidos nas parcelas permanentes. Além disso, houve diferença entre os valores de RP registrados no centro (entre rodagem) e na área de rodagem do *skidder* nas trilhas amostradas em cada UPA (FIGURA 12 A-D).

Quanto à zona de rodagem da trilha, ocorreu interação significativa para UPA ( $F_{crit} = 3,5134$ ,  $F = 13,8672$ ,  $P < 0,001$ ) e para profundidade ( $F_{crit} = 2,5906$ ,  $F = 7,4206$ ,  $P < 0,001$ ). A UPA A1A (2003) apresentou RP média (2,84 MPa) significativamente inferior ( $P < 0,05$ ) às demais UPAs, que não diferiram estatisticamente entre si.

Da mesma forma, no centro da trilha de arraste ocorreu interação significativa para UPA ( $F_{crit} = 3,5134$ ,  $F = 7,3193$ ,  $P < 0,001$ ) e para profundidade ( $F_{crit} = 2,5906$ ,  $F = 3,8033$ ,  $P < 0,001$ ). A UPA A1A (2003) também apresentou RP média (2,07 MPa) no centro da trilha significativamente inferior ( $P < 0,05$ ) às demais UPAs, que não diferiram estatisticamente entre si.

O maior valor médio de RP foi registrado na UPA MV01, com valores mínimos de 2,29 e 1,68 MPa e máximos de 4,70 e 3,24, na zona de rodagem e centro da trilha, respectivamente. De modo geral, a área com maior tempo pós-exploração (2003 – 9 anos) apresentou valores inferiores de RP no local de rodagem do *skidder* na trilha de arraste (FIGURA 12A).



**FIGURA 12.** Resistência do solo a penetração (RP) ao longo da profundidade (0 – 50 cm) nas trilhas de arraste (eixo e rodagem) das UPAs estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

Em termos de profundidade, a RP nas camadas de 15 a 20 cm e de 30 a 35 cm foi significativamente inferior às demais ( $P < 0,05$ ). Os maiores valores foram

registrados nas camadas 0 a 5 e 40 a 45 cm de profundidade ( $P < 0,05$ ). Porém, de modo geral verifica-se que os maiores valores de RP foram registrados entre 10 e 40 cm de profundidade (FIGURA 12).

Em relação ao centro da trilha de arraste, também foi observada interação significativa para os valores médios de RP entre profundidades ( $F_{crit} = 2,591$ ,  $F = 3,803$ ,  $P < 0,01$ ), UPAs ( $F_{crit} = 3,513$ ,  $F = 7,319$ ,  $P < 0,01$ ) e na interação UPA x profundidade ( $F_{crit} = 1,83$ ,  $F = 2,99$ ,  $P < 0,01$ ). Verifica-se na Figura 12 que os valores de RP nessa área foram inferiores aos obtidos no local de rodagem do *skidder*.

A UPA explorada em 2003, conforme observado na Figura 12A, com RP variando entre 1,68 e 2,69 MPa, apresentou média significativamente inferior às demais ( $P < 0,05$ ). As outras UPAs não diferiram estatisticamente entre si ( $P > 0,05$ ), porém a explorada em 2005 apresentou a maior RP média registrada no centro da trilha de arraste (FIGURA 12B).

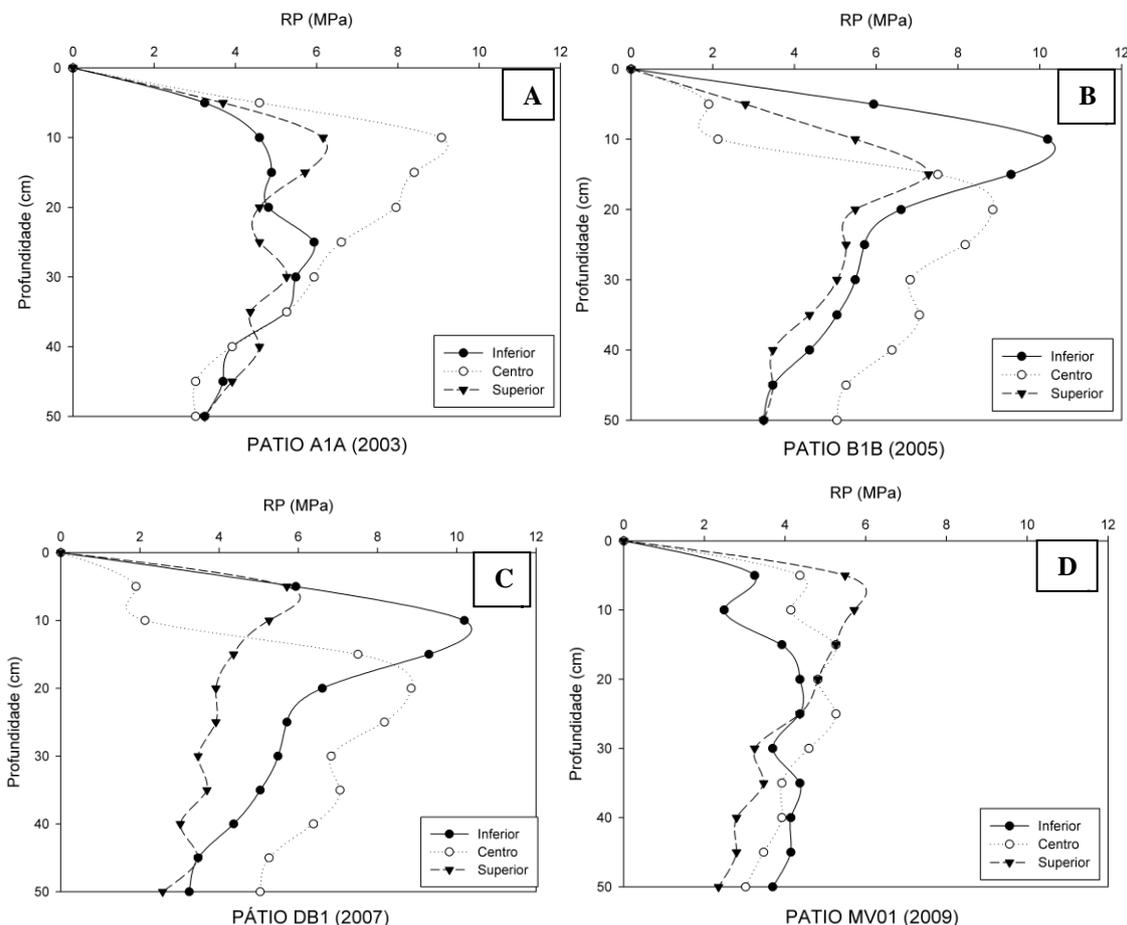
Verificou-se, portanto, que os valores médios de RP no centro das trilhas de arraste foram inferiores em todas as UPAs estudadas. Além disso, as trilhas de arraste mais recentemente utilizadas na exploração florestal, principalmente as da UPA MV01 (2009), apresentaram maior resistência do solo a penetração na zona de rodagem do *skidder* (FIGURA 12D).

### ***Pátios de estocagem de madeira***

Os valores de RP obtidos nos pátios foram maiores que os valores registrados nas parcelas permanentes e nas trilhas de arraste. A RP mínima registrada foi 1,90 MPa (UPA DB1 – 0 a 5 cm, centro) e a máxima foi 10,19 MPa (UPA DB1 – 5 a 10 cm, zona inferior). Foram verificadas diferenças nos valores de RP entre UPAs e entre locais amostrados dentro de uma mesma UPA (FIGURA 13 A-D). Em geral, os valores de RP nos pátios das UPAs anteriormente exploradas (2003, 2005 e 2007) foram superiores, ao menos em um dos três pontos de amostragem. Entre os locais amostrados dentro do pátio, o centro apresentou valores de RP altos, seguido da zona inferior de cada pátio (mais próxima à estrada principal).

Quanto aos valores médios de RP registrados na zona superior dos pátios, ocorreu interação significativa entre UPAs ( $F_{crit} = 2,719$ ,  $F = 2,947$ ,  $P < 0,05$ ), profundidades ( $F_{crit} = 2,639$ ,  $F = 8,202$  e  $P < 0,001$ ) e na interação UPA x profundidade ( $F_{crit} = 1,984$ ,  $F = 2,808$  e  $P < 0,01$ ). Em todas as UPAs, de modo geral, foram

verificados os menores valores de RP nessa zona, com exceção da UPA explorada em 2009 que registrou valores superiores a 5 cm de profundidade (FIGURA 13D). Nessa área superior do pátio, o *skidder* chega ao pátio com a tora arrastada, solta a tora e faz a manobra para fazer outra viagem vazio.



**FIGURA 13.** Resistência do solo a penetração ao longo da profundidade (0 – 50 cm) em pátios de estocagem de madeira das UPAs estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

No centro dos pátios de estocagem também ocorreu interação significativa entre UPAs ( $F_{crit} = 4,038$ ,  $F = 10,722$  e  $P < 0,001$ ), entre profundidades ( $F_{crit} = 2,639$ ,  $F = 5,743$  e  $P < 0,001$ ) e interação UPA x profundidade ( $F_{crit} = 1,984$ ,  $F = 2,497$  e  $P < 0,01$ ).

A UPA explorada em 2003 apresentou RP no centro do pátio próximo a 10 MPa, também a 10 cm de profundidade (FIGURA 13A), enquanto as UPAs exploradas em 2005 e 2007 apresentaram valores altos a 20 cm de profundidade. No centro de cada

pátio, circula a empilhadeira, máquina responsável por organizar as toras de madeira de modo a otimizar o espaço do pátio e facilitar o carregamento no caminhão bitrem.

Na zona inferior dos pátios estudados, também houve interação significativa entre UPAs ( $F_{crit} = 4,038$ ,  $F = 16,468$ ,  $P < 0,001$ ), profundidades ( $F_{crit} = 2,639$ ,  $F = 5,327$ ,  $P < 0,001$ ) e na interação UPA x profundidade ( $F_{crit} = 1,983$ ,  $F = 5,019$ ,  $P < 0,01$ ). As áreas exploradas em 2005 e 2007 apresentaram RP superior a 10 MPa nessa área, a 10 cm de profundidade, sendo os maiores valores registrados em todos os pátios amostrados. As toras de madeira ficam empilhadas nessa área do pátio, de onde são carregadas ao caminhão para o seu transporte.

## **4.2 ATRIBUTOS QUÍMICOS DOS SOLOS DA APA E DAS UPAs EXPLORADAS EM 2003, 2005, 2007 E 2009**

### **4.2.1 Avaliação da acidez e fertilidade do solo**

As médias dos atributos químicos do solo de cada UPA e APA estudadas estão apresentadas na Tabela 3. Ocorreu interação significativa entre profundidades para alguns atributos químicos do solo: P ( $F_{crit} = 5,39$ ,  $F = 6,10$ ,  $P < 0,01$ ),  $Al^{3+}$  ( $F_{crit} = 5,39$ ,  $F = 44,34$  e  $P < 0,01$ ), H+Al ( $F_{crit} = 5,39$ ,  $F = 23,40$ ,  $P < 0,01$ ) e saturação por alumínio (m) ( $F_{crit} = 3,32$ ,  $F = 3,89$ ,  $P < 0,05$ ). Pela comparação de médias, verificou-se que, na camada superficial do solo,  $Al^{3+}$ , H+Al e P foram significativamente superiores, decrescendo com o aumento da profundidade. Saturação por alumínio também apresentou tendência de diminuição ao longo da profundidade do solo, com teor significativamente menor na camada mais profunda (TABELA 3).

Não ocorreu interação significativa entre parcelas ( $P \geq 0,05$ ), com exceção de matéria orgânica e carbono orgânico, cujos dados estão apresentados no próximo tópico. Entretanto, ocorreu interação significativa entre UPAs e APA para os atributos: S ( $F_{crit} = 2,69$ ,  $F = 3,22$ ,  $P < 0,05$ ),  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  ( $F_{crit} = 20,9$ ,  $F = 4,02$ ,  $P < 0,01$ ),  $Al^{3+}$  ( $F_{crit} = 2,69$ ,  $F = 3,85$ ,  $P < 0,05$ ), V ( $F_{crit} = 2,69$ ,  $F = 3,22$ ,  $P < 0,05$ ) e m ( $F_{crit} = 2,69$ ,  $F = 3,42$ ,  $P < 0,05$ ).

**TABELA 3** - Atributos químicos dos solos amostrados na área de manejo na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si, na linha, pelo teste de Scott-Knott ( $P < 0,05$ ). Letras minúsculas referem-se à comparação entre áreas e letras maiúsculas à comparação entre profundidades. Médias sem letras não apresentaram diferenças significativas. Prof = profundidade; CO = carbono orgânico; MO = matéria orgânica, P = fósforo disponível;  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  = cálcio + magnésio trocável; K = potássio disponível; Na = sódio;  $Al^{3+}$  = alumínio trocável; H+Al = acidez potencial; CTC = capacidade de troca catiônica; V = saturação por bases; m = saturação por alumínio.

UPA	Prof	pH	CO	MO**	P*	S	$Ca^{2+}+Mg^{2+}$	K	Na	$Al^{3+}$	H+Al	CTC***	V	m
	cm		-----g kg <sup>-1</sup> -----		-----mg dm <sup>-3</sup> -----		-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----						-----%	
A1A(2003)	0-10	3,67	25,03 <b>bA</b>	43,15 <b>bA</b>	12,03 <b>A</b>	11,67 <b>a</b>	0,50 <b>b</b>	0,32	0,09	2,13 <b>bA</b>	4,70 <b>A</b>	5,61	16,67 <b>a</b>	69,70 <b>bA</b>
	10-30	3,80	16,57 <b>bB</b>	28,57 <b>bB</b>	0,83 <b>B</b>	9,73 <b>a</b>	0,37 <b>b</b>	0,06	0,01	1,57 <b>bB</b>	4,00 <b>B</b>	4,44	10,00 <b>a</b>	78,23 <b>bA</b>
	30-50	4,13	11,93 <b>bC</b>	20,57 <b>bC</b>	0,33 <b>B</b>	11,77 <b>a</b>	0,43 <b>b</b>	0,04	0,01	1,13 <b>bC</b>	3,27 <b>C</b>	3,75	12,67 <b>a</b>	70,27 <b>bB</b>
B1B(2005)	0-10	3,47	37,20 <b>aA</b>	64,13 <b>aA</b>	1,80 <b>A</b>	12,63 <b>a</b>	0,57 <b>a</b>	0,16	0,02	2,80 <b>aA</b>	6,50 <b>A</b>	7,25	10,67 <b>a</b>	78,10 <b>bA</b>
	10-30	3,73	23,13 <b>aB</b>	39,88 <b>aB</b>	0,83 <b>B</b>	9,87 <b>a</b>	0,70 <b>a</b>	0,04	0,01	2,10 <b>aB</b>	4,33 <b>B</b>	5,09	15,00 <b>a</b>	73,20 <b>bA</b>
	30-50	4,10	14,53 <b>aC</b>	25,05 <b>aC</b>	0,57 <b>B</b>	7,87 <b>a</b>	0,53 <b>a</b>	0,05	0,01	1,47 <b>aC</b>	3,20 <b>C</b>	3,79	15,67 <b>a</b>	70,97 <b>bB</b>
DB1(2007)	0-10	3,40	30,57 <b>aA</b>	52,70 <b>aA</b>	0,90 <b>A</b>	8,83 <b>a</b>	0,37 <b>bc</b>	0,08	0,02	2,20 <b>aA</b>	4,10 <b>A</b>	4,56	10,00 <b>a</b>	82,77 <b>bA</b>
	10-30	3,70	19,97 <b>aB</b>	34,43 <b>aB</b>	1,23 <b>B</b>	8,20 <b>a</b>	0,37 <b>bc</b>	0,11	0,01	1,60 <b>bB</b>	4,00 <b>B</b>	4,49	10,67 <b>a</b>	76,60 <b>bA</b>
	30-50	4,03	15,57 <b>aC</b>	26,84 <b>aC</b>	0,73 <b>B</b>	10,77 <b>a</b>	0,33 <b>bc</b>	0,12	0,03	1,30 <b>bC</b>	3,63 <b>C</b>	4,12	11,67 <b>a</b>	73,20 <b>bB</b>
MV01(2009)	0-10	3,37	29,53 <b>aA</b>	50,91 <b>aA</b>	0,60 <b>A</b>	9,47 <b>a</b>	0,33 <b>bc</b>	0,07	0,02	2,03 <b>bA</b>	4,77 <b>A</b>	5,19	8,33 <b>b</b>	82,73 <b>aA</b>
	10-30	3,73	20,97 <b>aB</b>	36,15 <b>aB</b>	0,33 <b>B</b>	7,87 <b>b</b>	0,37 <b>bc</b>	0,05	0,01	1,60 <b>bB</b>	3,57 <b>B</b>	4,00	10,67 <b>b</b>	78,77 <b>aA</b>
	30-50	4,00	17,07 <b>aC</b>	29,43 <b>aC</b>	0,33 <b>B</b>	5,57 <b>b</b>	0,33 <b>bc</b>	0,04	0,01	1,43 <b>bC</b>	3,10 <b>C</b>	3,48	11,00 <b>b</b>	78,93 <b>aB</b>
APA	0-10	3,40	28,87 <b>aA</b>	49,77 <b>aA</b>	0,73 <b>A</b>	8,87 <b>b</b>	0,30 <b>c</b>	0,06	0,01	2,30 <b>bA</b>	4,43 <b>A</b>	4,80	7,67 <b>b</b>	86,07 <b>aA</b>
	10-30	3,80	18,30 <b>aB</b>	31,55 <b>aB</b>	1,50 <b>B</b>	6,30 <b>b</b>	0,30 <b>c</b>	0,11	0,01	1,63 <b>bB</b>	3,50 <b>B</b>	3,9	10,67 <b>b</b>	79,47 <b>aA</b>
	30-50	4,03	13,97 <b>aC</b>	24,08 <b>aC</b>	3,63 <b>B</b>	8,77 <b>b</b>	0,30 <b>c</b>	0,14	0,03	1,47 <b>bC</b>	3,80 <b>C</b>	4,27	11,00 <b>b</b>	76,63 <b>aB</b>
<b>Média</b>		3,75	21,55	37,15	1,76	9,21	0,41	0,10	0,02	1,78	4,06	4,58	11,49	77,04
<b>Desvio padrão</b>	<b>0-50</b>	0,26	7,33	12,63	2,96	1,97	0,12	0,07	0,02	0,45	0,85	0,95	2,54	4,84
<b>CV (%)</b>			16,65	17,00	34,15	26,05	26,51	13,97	9,06	27,76	6,94	23,65	26,05	7,50

\*extrator Mehlich-1; \*\*método Walkley-Black (MO = CO x 1,724); \*\*\* CTC a pH 7,0

Os resultados indicaram, de maneira geral, alta acidez ativa (pH médio 3,75) (EMBRAPA, 2009) e alta toxidez por alumínio ( $> 1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em todas as áreas e profundidades do solo estudadas (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Além disso, os teores de acidez potencial (H+Al) indicaram média a alta toxidez ( $> 5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), com alta a muito alta saturação por alumínio ( $> 75\%$ ). Muito relacionados com o nível de acidez do solo, os teores de cálcio e magnésio ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ) apresentaram valores baixos (TOMÉ JÚNIOR, 1997), conforme verificado na Tabela 3.

A soma das bases variou de muito baixa a baixa ( $< 1,80 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e a CTC foi baixa em todas as áreas e profundidades ( $< 9,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) (TOMÉ JÚNIOR, 1997). O valor médio de saturação por bases (V) de todas as UPAs foi 11,5%, classificando o solo como distrófico ( $V < 50\%$ ) (EMBRAPA, 2009).

Os teores de fósforo (P) foram considerados muito baixos ( $< 2,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ), com exceção da camada superficial na UPA A1A e da camada mais profunda na APA, com teores altos (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Por outro lado, os teores de potássio (K) variaram de baixo a alto ( $> 0,13 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), com destaque para a camada superficial na UPA A1A, também com teor alto. Já os teores de sódio (Na) foram considerados baixos ( $< 0,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em todas as profundidades e áreas, sendo verificado teor médio mais elevado na camada superficial da UPA A1A (2003). Os teores de S variaram de médio a adequado ( $> 10 \text{ mg dm}^{-3}$ ) (TOMÉ JÚNIOR, 1997).

Quanto às diferenças estatísticas entre as áreas, a UPA B1B (2005) apresentou teores médios significativamente mais elevados de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ , enquanto a APA apresentou médias significativamente inferiores. Os teores de cálcio e magnésio, em geral, apresentaram tendência de diminuição ao longo dos pós-exploração (2005  $>$  2003  $>$  2007  $>$  2009).

O teor médio de S mais elevado foi registrado na UPA A1A ( $11,06 \text{ g kg}^{-1}$ ), que não diferiu estatisticamente das UPAs B1B e DB1. Já as médias dos teores desse nutriente foram significativamente inferiores na UPA MV01 ( $7,63 \text{ g kg}^{-1}$ ), enquanto a APA apresentou teor médio de enxofre ( $7,98 \text{ g kg}^{-1}$ ). Novamente, de modo geral, foi observada diminuição dos valores médios ao longo dos anos pós-exploração (2003  $>$  2005  $>$  2007  $>$  2009).

Ainda que não tenham apresentado diferenças estatísticas, os valores médios dos demais nutrientes do solo variaram entre as áreas estudadas. Com nove anos pós-exploração, a UPA A1A apresentou os maiores teores médios de P, K e Na, verificados na camada superficial do solo nessa área. Os teores médios de nutrientes nessa camada

foram os mais elevados em comparação às demais profundidades e às outras UPAs e APA.

Logo após essa UPA, a APA apresentou os teores médios mais elevados desses nutrientes no solo, porém com valores superiores na camada mais profunda do solo (30 a 50 cm). Já a UPA mais recentemente explorada (2009) obteve os menores teores médios de P, K e Na (TABELA 3).

Pelos resultados da correlação de Pearson, houve significância estatística ( $P < 0,05$ ) entre  $Al^{3+}$  e CTC (0,87),  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  e Ds (-0,57),  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  e argila (0,69), H+Al e Al (0,88),  $Al^{3+}$  e MO (-0,90), CTC e MO (-0,70), H+Al e MO (-0,73),  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  e S (0,72), bem como entre MO e Uv (-0,57).

#### 4.2.2 Matéria orgânica (MO) e carbono orgânico (CO)

Como os teores de MO do solo foram obtidos a partir dos teores de CO, ambas as variáveis apresentaram correlação 1,0. Assim, conforme observado na Tabela 3, em que são apresentadas suas médias para as três profundidades de cada área estudada, os teores de MO e CO variaram proporcionalmente.

A média geral do teor de MO das amostras de solo foi  $37,15 \text{ g kg}^{-1}$ , valor classificado como médio (entre  $15 \text{ e } 50 \text{ g kg}^{-1}$ ) (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Porém, foram observados valores altos ( $> 50 \text{ g kg}^{-1}$ ) nas camadas superficiais de quase todas as áreas, conforme verificado na Tabela 3 (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Não foi registrado nenhum teor de MO considerado baixo ( $< 15 \text{ g kg}^{-1}$ ). Foram verificadas interações significativas entre profundidades ( $F_{crit} = 5,39$ ,  $F = 53,53$ ,  $P < 0,01$ ) e entre UPAs ( $F_{crit} = 4,02$ ,  $F = 5,02$ ,  $P < 0,01$ ), porém com interação UPA x profundidade não significativa ( $P > 0,05$ ).

Em relação às profundidades, a camada mais superficial do solo apresentou teor de MO significativamente mais elevado ( $P < 0,05$ ), o qual decresceu com o aumento da profundidade em todas as áreas. O maior teor médio foi verificado para a camada superficial da UPA explorada em 2005 ( $76,9 \text{ g kg}^{-1}$ ), enquanto o menor teor médio foi observado na camada mais profunda da UPA explorada em 2003 ( $19,8 \text{ g kg}^{-1}$ ).

Entre as áreas estudadas, também foram observadas diferenças significativas quanto aos respectivos teores médios de MO. A UPA explorada em 2003 apresentou teor médio de MO ( $30,7 \text{ g kg}^{-1}$ ) significativamente inferior ( $P < 0,05$ ). Já na UPA explorada em 2005 foi verificado o maior teor de MO no solo ( $42,9 \text{ g kg}^{-1}$ ). A APA apresentou o segundo menor teor médio de MO ( $35,1 \text{ g kg}^{-1}$ ).

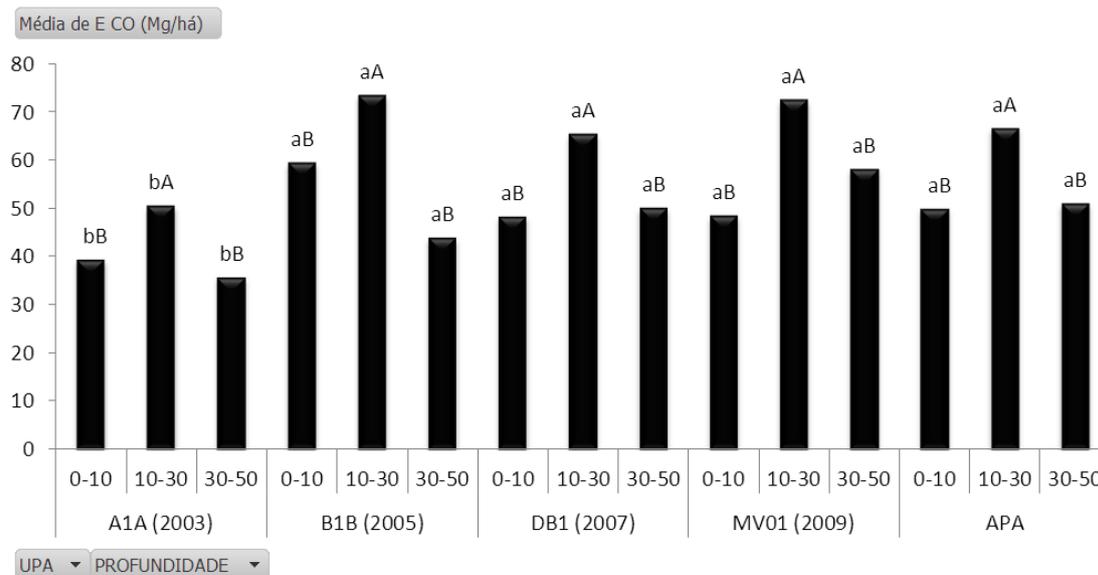
Quanto ao CO do solo, a média geral foi de  $21,55 \text{ g kg}^{-1}$ , considerado um teor médio (entre  $9$  e  $29 \text{ g kg}^{-1}$ ) de carbono orgânico no solo (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Foram observados teores considerados médios nas camadas mais profundas do solo e teores altos ( $> 29 \text{ g kg}^{-1}$ ) na camada superficial de todas as áreas (TOMÉ JÚNIOR, 1997), com exceção da UPA explorada em 2003 (TABELA 3). Ocorreram interações significativas entre profundidades ( $F_{\text{crit}} = 5,39$ ,  $F = 53,89$ ,  $P < 0,01$ ) e entre UPAs ( $F_{\text{crit}} = 4,02$ ,  $F = 5,49$ ,  $P < 0,01$ ), com interação UPA x profundidade não significativa ( $P > 0,05$ ).

Em relação às áreas estudadas, o solo da UPA explorada em 2003 apresentou teor médio de CO ( $17,8 \text{ g kg}^{-1}$ ) significativamente inferior ( $P < 0,05$ ) às demais áreas. Por outro lado, a área explorada em 2005 apresentou o teor médio de CO mais elevado ( $25,0 \text{ g kg}^{-1}$ ), seguida da UPA mais recentemente explorada ( $22,5 \text{ g kg}^{-1}$ ). Já a APA apresentou o segundo menor teor médio de CO ( $20,4 \text{ g kg}^{-1}$ ). Verificou-se, portanto, a seguinte tendência de diminuição dos teores médios de MO e CO por UPA ao longo dos anos pós-exploração:  $2005 > 2009 > 2007 > 2003$ .

#### **4.2.3 Estoque de carbono orgânico (ECO)**

Quanto ao estoque de carbono orgânico (ECO) estimado neste estudo, foram verificadas diferenças entre as profundidades e entre as áreas estudadas, conforme verificado na Figura 14. O teor médio de ECO de todas as áreas foi  $54,26 \text{ Mg ha}^{-1}$ , com ECO mínimo de  $20,5$  (UPA A1A, 0-10 cm) e máximo de  $82,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  (UPA MV01, 0-10 cm). O coeficiente de variação dos dados foi  $17,7\%$ .

Ocorreu interação significativa entre profundidades ( $F_{\text{crit}} = 5,39$ ,  $F = 16,18$ ,  $P < 0,01$ ) e entre UPAs ( $F_{\text{crit}} = 4,02$ ,  $F = 5,03$ ,  $P < 0,01$ ), mas a interação UPA x profundidade não foi significativa ( $P > 0,05$ ). Em relação às profundidades estudadas, houve diferença significativa entre a segunda (10-30 cm) e as demais camadas do solo ( $P < 0,05$ ), como observado na Figura 14. Essa camada do solo apresentou ECO médio significativamente superior ( $65,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), enquanto o menor ECO médio ( $47,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) foi registrado na camada mais profunda do solo (30-50 cm). Com exceção das UPAs A1A e B1B, todas as áreas apresentaram menor ECO na camada superficial do solo.



**FIGURA 14.** Valores médios de estoque de carbono orgânico (ECO), em  $\text{Mg ha}^{-1}$ , nas três profundidades, em cm, dos solos amostrados nas UPAs e na APA da Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. As letras minúsculas referem-se à comparação entre as áreas e as letras maiúsculas à comparação entre as profundidades.

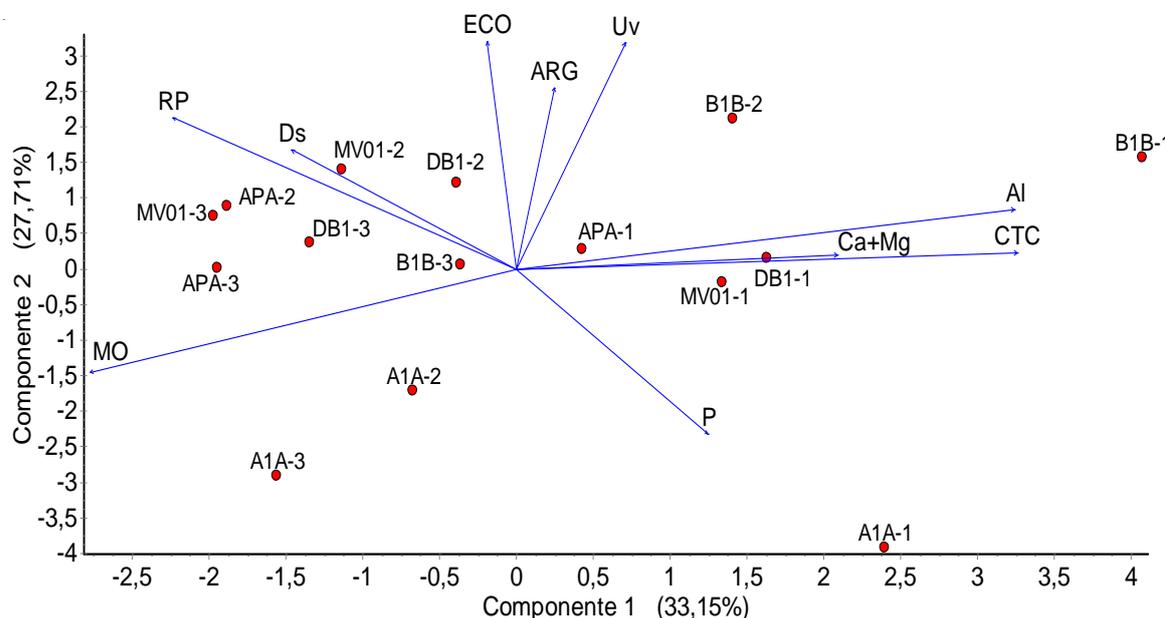
Quanto às diferenças entre os valores médios de ECO das UPAs e da APA, foi observada diferença significativa entre a UPA explorada em 2003 e as demais áreas. Conforme verificado na Figura 14, o ECO médio ( $42,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) dessa UPA foi significativamente inferior às demais médias ( $P < 0,05$ ), as quais não diferiram estatisticamente entre si ( $P > 0,05$ ). Já a UPA explorada em 2009 apresentou o maior ECO médio ( $59,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), enquanto a APA obteve o terceiro maior ECO médio ( $55,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). De modo geral, foi verificada a seguinte tendência de aumento no ECO do solo ao longo dos anos pós-exploração:  $2003 < 2007 < 2005 < 2009$ .

Foi verificada correlação significativa ( $P < 0,05$ ) entre ECO e RP (0,61) e entre ECO e o teor de Mg da serapilheira (-0,57).

### 4.3 ORDENAÇÃO DAS ÁREAS EM RELAÇÃO AOS ATRIBUTOS DO SOLO

Os resultados da PCA para os atributos físicos e químicos dos solos são mostrados no diagrama da Figura 15, representado pelos dois primeiros componentes das correlações entre as três profundidades dos solos das áreas estudadas e seus atributos físicos e químicos. Nessa análise, os dois primeiros componentes extraídos a partir das dez variáveis analisadas apresentaram autovalores mais elevados ( $> 1,0$ )

(FELFILI et al., 2011) e explicaram a maior parte da variação dos atributos do solo nas áreas estudadas (60,9%).



**FIGURA 15.** Diagrama de ordenação (*biplot*) produzido pela análise de componentes principais (PCA) com base nos atributos químicos e físicos, por profundidade, dos solos coletados na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. O diagrama foi construído a partir dos dois componentes principais. 1 = 0 a 10 cm; 2 = 10 a 30 cm; e 3 = 30 a 50 cm de profundidade do solo.

O primeiro componente apresentou autovalor 3,31 e foi responsável por 33,2% da variância dos dados. Conforme observado na Figura 15 e na Tabela 4, seus coeficientes correlacionaram-se positivamente com CTC (0,91) e alumínio trocável ( $Al^{3+}$ ) (0,91). Negativamente, correlacionaram-se com matéria orgânica (MO) (-0,78) e resistência a penetração (RP) (-0,63).

Já o segundo componente apresentou autovalor 2,77 e foi responsável por 27,7% da variância dos dados. Conforme apresentado na Figura 15 e na Tabela 4, esse componente correlacionou-se positivamente com estoque de carbono orgânico (ECO) (0,82), umidade volumétrica (Uv) (0,81) e teor de argila (0,65). Porém, negativamente, correlacionou-se com teor de fósforo disponível (P) (-0,59) e matéria orgânica (MO) (-0,37).

**TABELA 4** - Autovetores e coeficientes de correlação entre os atributos dos solos e os dois componentes principais obtidos a partir da PCA para os solos coletados na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

Atributo	Componente 1		Componente 2	
	Autovetor	Correlação	Autovetor	Correlação
Argila	0,038	0,068	0,391	0,651
P	0,191	0,347	-0,356	-0,593
Al <sup>3+</sup>	0,497	0,905	0,127	0,212
CTC	0,500	0,911	0,035	0,058
Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>	0,320	0,583	0,030	0,050
MO	-0,426	-0,776	-0,223	-0,371
Uv	0,108	0,197	0,488	0,813
Ds	-0,225	-0,410	0,258	0,429
RP	-0,343	-0,625	0,327	0,544
ECO	-0,029	-0,053	0,491	0,817

Na Tabela 5 são apresentados os escores de cada camada do solo estudada nas UPAs e na APA, os quais ordenaram e projetaram as áreas estudadas no diagrama de ordenação. Observou-se que quanto maior o valor do escore, maior foi a distância do ponto em relação ao centro do diagrama (FIGURA 15).

**TABELA 5** - Escores das áreas estudadas e suas respectivas profundidades em relação aos dois componentes principais da PCA para os atributos físicos e químicos dos solos coletados na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

UPA	Ano	Ponto	Profundidade (cm)	CP 1	CP 2
A1A	2003	A1A-1	0-10	2,394	-3,924
		A1A-2	10-30	-0,673	-1,724
		A1A-3	30-50	-1,557	-2,921
B1B	2005	B1B-1	0-10	4,073	1,557
		B1B-2	10-30	1,410	2,109
		B1B-3	30-50	-0,363	0,057
DB1	2007	DB1-1	0-10	1,627	0,147
		DB1-2	10-30	-0,391	1,211
		DB1-3	30-50	-1,346	0,364
MV01	2009	MV01-1	0-10	1,337	-0,190
		MV01-2	10-30	-1,135	1,401
		MV01-3	30-50	-1,968	0,736
APA	NE	APA-1	0-10	0,426	0,272
		APA-2	10-30	-1,885	0,888
		APA-3	30-50	-1,948	0,017

NE = não explorada; CP = componente principal.

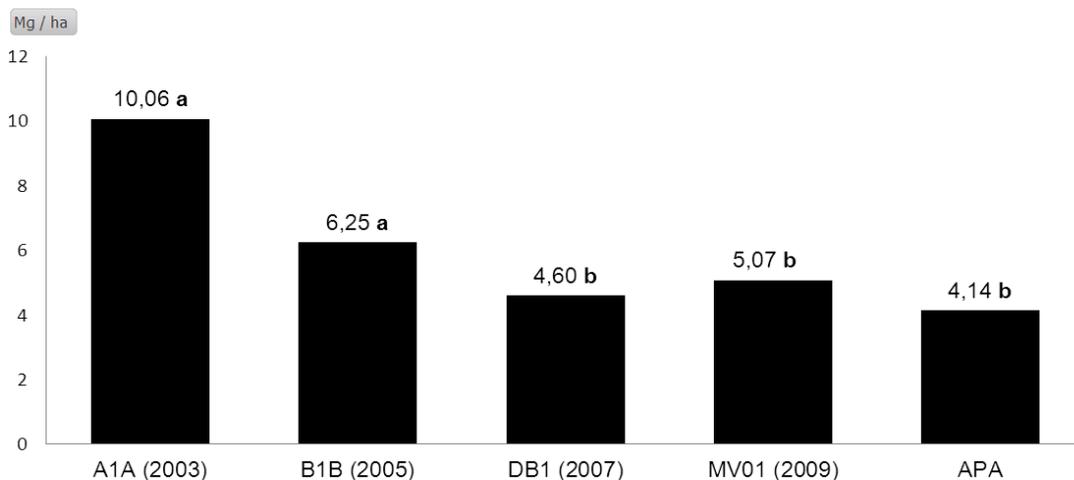
Desse modo, no eixo do componente 1, as camadas superficiais das UPAs e da APA, com escores mais elevados, apresentaram maior correlação com  $Al^{3+}$ , CTC e  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ , com exceção da UPA A1A, cuja camada superficial apresentou maior correlação com P (eixo 2). Por outro lado, a camada mais profunda (30 a 50 cm) das UPAs (exceto a A1A) e da APA, com maiores escores negativos nesse eixo, apresentaram maior correlação com MO. Assim, de modo geral, esse eixo ordenou as áreas em relação à fertilidade e acidez do solo.

Já no eixo do componente 2 observou-se que a camada superficial da UPA A1A, com escore negativo, apresentou alta correlação com P e as demais camadas dessa UPA correlacionaram-se negativamente com umidade volumétrica e teor de argila. Já na parte superior desse eixo, a camada de 10 a 30 cm da UPA B1B apresentou maior correlação com  $U_v$ , enquanto a mesma camada da UPA DB1 correlacionou-se com ECO e a da MV01 com densidade do solo. Esse eixo ordenou as áreas em relação aos atributos físicos e estoque de carbono orgânico do solo.

#### **4.4 BIOMASSA E NUTRIENTES DA SERAPILHEIRA DA APA E DAS UPAs EXPLORADAS EM 2003, 2005, 2007 E 2009**

Em termos de estoque de serapilheira, ou biomassa de serapilheira, houve interação significativa entre as áreas estudadas ( $F_{crit} = 4,0179$ ,  $F = 5,3437$ ,  $P < 0,01$ ). Verificou-se pela comparação estatística das médias que as UPAs exploradas em 2003 e 2005 apresentaram valores significativamente superiores às outras UPAs e APA. Nesta última foi registrado o menor valor dessa variável (FIGURA 16).

Observa-se na Figura 16 que as UPAs apresentaram maior biomassa de serapilheira sobre o solo em comparação à APA, com tendência de diminuição ao longo dos anos pós exploração:  $2003 > 2005 > 2009 > 2007$ . A UPA explorada em 2003 apresentou valor significativamente mais elevado, enquanto a UPA explorada em 2007 apresentou a menor média entre as UPAs, cujo valor foi mais que 50% inferior ao da UPA de 2003. A UPA explorada em 2009 também apresentou baixo estoque de serapilheira, porém não diferiu estatisticamente da APA.



**FIGURA 16.** Valores médios dos estoques de serapilheira, em Mg ha<sup>-1</sup>, das UPAs e APA estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. Os valores acima das barras representam as médias de cada UPA e APA. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ( $P < 0,05$ ).

Os valores médios dos nutrientes da serapilheira coletada nas áreas estudadas, assim como as respectivas comparações estatísticas são apresentados na Tabela 6. Ocorreu interação significativa entre UPAs para os atributos: K ( $F_{crit} = 4,0179$ ,  $F = 16,3959$ ,  $P < 0,01$ ), Ca ( $F_{crit} = 4,0179$ ,  $F = 9,8066$ ,  $P < 0,01$ ) e CO ( $F_{crit} = 2,6896$ ,  $F = 2,8112$ ,  $P < 0,05$ ).

De acordo com a Tabela 6, o teor médio de K foi significativamente superior na serapilheira da APA, seguido da UPA explorada em 2009. Quanto a esse nutriente, as UPAs mais anteriormente exploradas obtiveram teores médios significativamente inferiores ( $2003 < 2005 < 2007 < 2009$ ).

Quanto aos teores médios de Ca, também houve diferença significativa entre as áreas. A UPA explorada em 2005 obteve o maior valor médio, significativamente superior à APA. Por outro lado, o menor teor médio de Ca foi verificado na UPA explorada em 2003, significativamente inferior ao valor médio da serapilheira da APA. Desse modo, houve a seguinte tendência de aumento desse nutriente na serapilheira:  $2003 < 2009 < 2007 < 2005$  (TABELA 6).

**TABELA 6** - Comparação entre as médias dos nutrientes ( $\text{g kg}^{-1}$ ) na serapilheira coletada nas subparcelas de 0,5 x 0,5 m amostradas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. Os valores entre parênteses representam o desvio padrão. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si, na coluna, pelo teste de Scott-Knott ( $P < 0,05$ ). Médias sem letras não apresentaram diferenças significativas. N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; S = enxofre; CO = carbono orgânico.

UPA	Ano	N	P	K	Ca	Mg	S	CO
-----g kg <sup>-1</sup> -----								
A1A	2003	11,67 (±1,67)	0,55 (±0,01)	2,60c (±1,17)	1,31 c (±0,34)	0,72 (±0,16)	1,23 (±0,19)	162,44a (±61,49)
B1B	2005	11,97 (±2,37)	0,57 (±0,01)	2,33c (±0,25)	2,20 a (±0,64)	0,94 (±0,10)	1,26 (±0,31)	136,67a (±41,93)
DB1	2007	11,68 (±0,86)	0,54 (±0,03)	3,43b (±0,93)	2,07 a (±0,57)	0,83 (±0,04)	1,20 (±0,11)	110,33a (±16,26)
MV01	2009	12,59 (±1,02)	0,54 (±0,01)	3,60b (±0,29)	1,80 b (±0,21)	0,80 (±0,09)	1,37 (±0,08)	67,11b (±22,77)
APA	NE	14,26 (±2,28)	0,58 (±0,02)	4,21a (±0,77)	1,60 b (±0,13)	0,81 (±0,11)	1,14 (±0,07)	137,00a (±78,81)
Média		12,43	0,56	3,24	1,80	0,82	1,24	122,71
Desvio padrão		(±1,79)	(±0,02)	(±0,96)	(±0,49)	(±0,11)	(±0,17)	(±53,52)
CV (%)		31,3	12,1	17,5	12,4	7,7	21,3	11,5

Os teores médios de CO da serapilheira também variaram entre as áreas. O maior teor médio foi observado na serapilheira da UPA A1A (2003) ( $162,4 \text{ g kg}^{-1}$ ), seguida da APA ( $137,0 \text{ g kg}^{-1}$ ). Destaca-se, entre as UPAs, o teor médio significativamente inferior registrado na UPA explorada em 2009 ( $67,1 \text{ g kg}^{-1}$ ). Foi verificada, assim, tendência de aumento do teor de CO na serapilheira ao longo dos anos pós-exploração ( $2009 < 2007 < 2005 < 2003$ ).

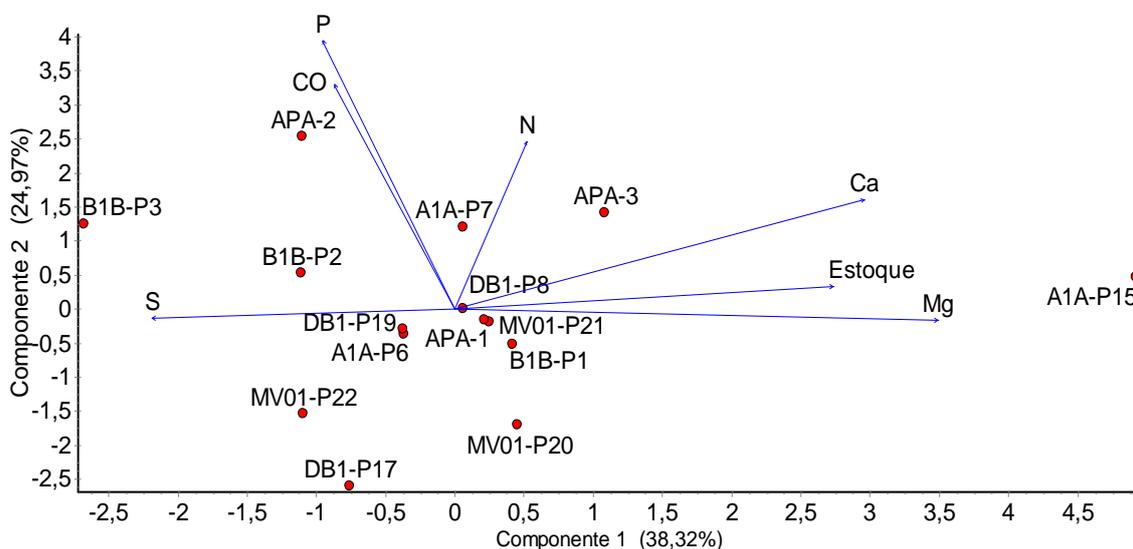
A APA, apesar de ter apresentado o menor estoque de serapilheira, obteve os maiores teores médios de N, P e K (significativamente superior), bem como o segundo maior teor médio de CO em sua serapilheira. Entretanto, obteve o segundo menor teor médio de Ca e o menor teor médio de S. Por outro lado, a UPA explorada em 2003, com o maior estoque de serapilheira, apresentou o maior teor de CO a despeito dos menores teores de N, Ca, Mg e o segundo menor teor de K. A área mais recentemente explorada (2009), com o terceiro maior estoque de serapilheira, obteve o maior teor de S, o segundo maior teor de N e os menores teores de CO e P (TABELA 6).

Pelos resultados da correlação de Pearson, houve correlação significativa ( $P < 0,05$ ) entre Ca e Mg (0,75), estoque de serapilheira e Mg (-0,58) e entre CO e P (0,53).

Os demais nutrientes presentes nas amostras de serapilheira não apresentaram correlação significativa entre si ( $P > 0,05$ ).

#### 4.5 ORDENAÇÃO DA APA E DAS UPAs EM RELAÇÃO À SERAPILHEIRA

Os resultados da análise de componentes principais (PCA) para os atributos da serapilheira são apresentados na Figura 17. Nessa análise, os três componentes principais extraídos a partir das sete variáveis analisadas obtiveram autovalores mais elevados ( $> 1,0$ ) e, em conjunto, foram responsáveis por 78,2% da variância acumulada dos dados.



**FIGURA 17.** Diagrama de ordenação (*biplot*) produzido pela análise de componentes principais (PCA) com base na biomassa e nos nutrientes das serapilheiras coletadas nas parcelas permanentes das UPAs e da APA estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. O diagrama foi construído a partir dos dois componentes principais.

Os dois primeiros componentes foram responsáveis por 63,3% da variância da biomassa e dos nutrientes das serapilheiras amostradas. O primeiro componente apresentou autovalor 2,68 e foi responsável por 38,3% da variância total. Seus coeficientes correlacionaram-se positivamente com magnésio (Mg) (0,96), cálcio (Ca) (0,82) e estoque de serapilheira (0,76); por outro lado, correlacionaram-se negativamente com enxofre (S) (-0,61) (TABELA 7).

O autovalor do segundo componente foi 1,75 e a porcentagem de variância dos dados foi 25,0%. Esse componente somente apresentou correlação positiva com P (0,88), CO (0,73) e N (0,55), conforme verificado na Figura 17 e na Tabela 7.

A ordenação das áreas estudadas por vetores das variáveis da serapilheira indicou que, no eixo do componente 1, estoque de serapilheira, Ca e Mg apresentaram alta correlação positiva entre si e correlacionaram-se negativamente com S. Além do mais, P e CO apresentaram alta correlação entre si, no eixo do componente 2 (FIGURA 17).

**TABELA 7** - Autovetores e coeficientes de correlação entre os atributos da serapilheira e os dois componentes principais obtidos a partir da PCA para as amostras de serapilheira coletadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

Atributo	Componente 1		Componente 2	
	Autovetor	Correlação	Autovetor	Correlação
N	0,09	0,14	0,42	0,55
P	-0,16	-0,26	0,66	0,88
S	-0,37	-0,61	-0,02	-0,03
Estoque de serapilheira	0,46	0,76	0,05	0,07
CO	-0,15	-0,24	0,56	0,73
Mg	0,59	0,96	-0,03	-0,03
Ca	0,50	0,82	0,27	0,36

Na Tabela 8 são apresentados os escores das parcelas amostradas nas UPAs e na APA, que as ordenaram e projetaram no diagrama da PCA. Observou-se que quanto maior o valor do escore da parcela, maior foi a distância da mesma em relação ao centro do diagrama. Sendo assim, as parcelas das UPAs e da APA foram ordenadas de maneira distinta em relação aos dois eixos do diagrama (FIGURA 17).

Em relação ao eixo do componente 1, a parcela P15 da UPA A1A apresentou alta correlação com Mg e estoque de serapilheira, enquanto a parcela P3 da UPA B1B apresentou alta correlação com enxofre, na parte negativa desse eixo (FIGURA 17). Também no lado negativo encontraram-se ordenadas as parcela P2 da UPA B1B, P19 da UPA DB1 e P22 da UPA MV01. Essas últimas apresentaram alta correlação entre si e com o teor de enxofre da serapilheira (TABELA 8).

**TABELA 8-** Escores das parcelas amostradas em relação aos eixos dos componentes principais da PCA para biomassa e nutrientes das serapilheiras coletadas nas áreas estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

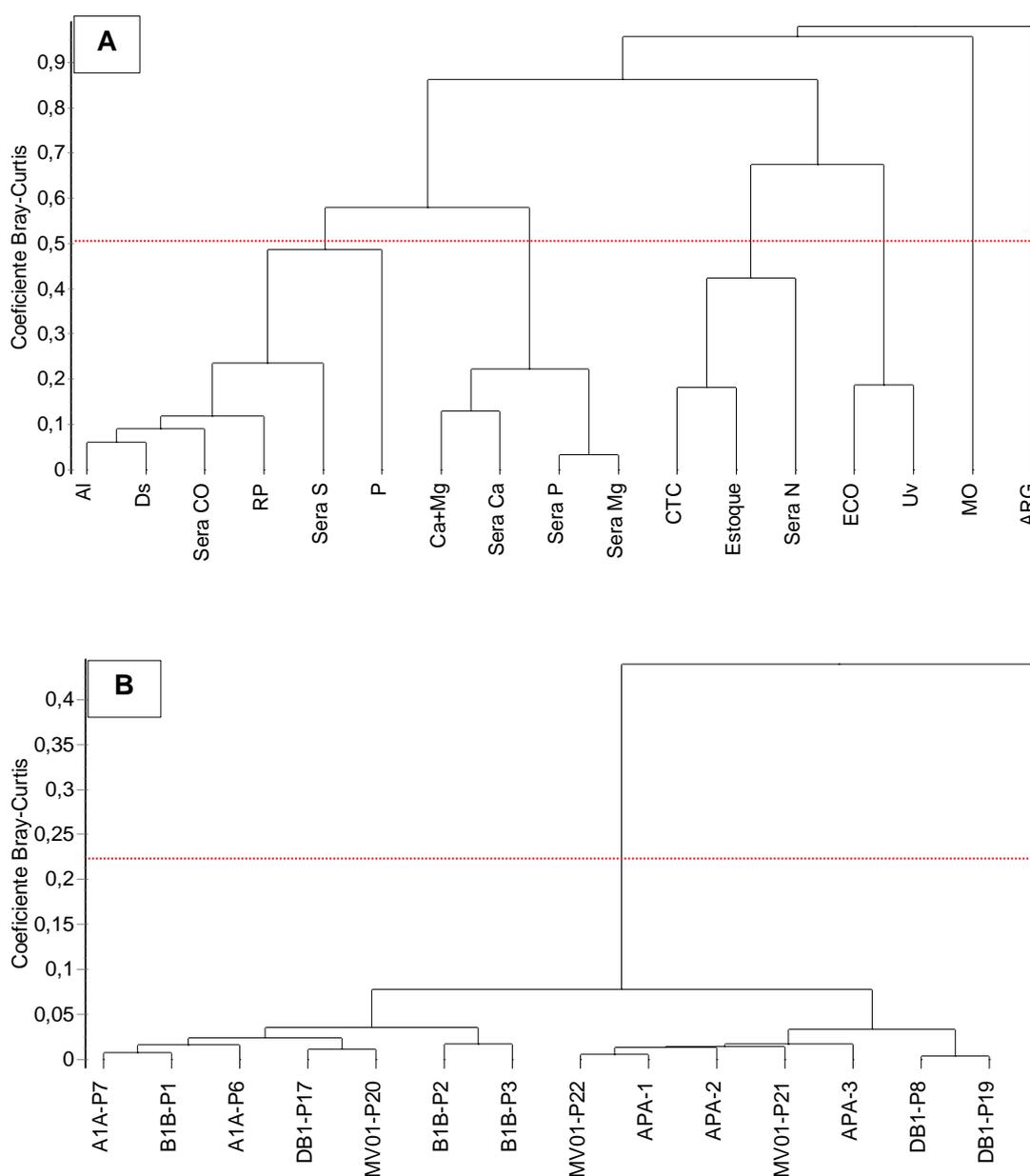
<b>UPA-Parcela</b>	<b>Ano</b>	<b>CP 1</b>	<b>CP 2</b>
A1A - P15		4,923	0,460
A1A - P7	2003	0,063	1,198
A1A - P6		-0,363	-0,376
B1B - P2		-1,109	0,528
B1B - P3	2005	-2,676	1,241
B1B - P1		0,421	-0,521
DB1 - P8		0,060	0,008
DB1 - P17	2007	-0,758	-2,602
DB1 - P19		-0,370	-0,297
MV01 - P20		0,453	-1,705
MV01 - P21	2009	0,251	-0,189
MV01 - P22		-1,094	-1,532
APA - 1		0,219	-0,163
APA - 2	NE	-1,101	2,533
APA - 3		1,083	1,415

NE = não explorada; CP = componente principal.

Em relação ao eixo do componente 2, as áreas foram ordenadas com base nos teores de N, CO e P (superior). Ao teor de P, com o maior peso nesse componente e altamente correlacionado com CO, se correlacionou positivamente a parcela 2 da APA, enquanto as parcelas P7 da UPA A1A e 3 da APA apresentaram maior correlação positiva com N. Por outro lado, a parcela P20 da UPA MV01 apresentou correlação negativa com P e CO da serapilheira, enquanto as parcelas P22 da mesma UPA e a P17 da UPA DB1 correlacionaram-se negativamente com N.

#### **4.6 CLASSIFICAÇÃO DAS UPAs E DA APA**

Nas Figuras 18A e 18B podem ser visualizados os dendrogramas obtidos pelas análises de agrupamentos (cluster), utilizando a distância de Bray-Curtis como medida de similaridade entre os atributos do solo e da serapilheira utilizados nas PCAs finais (A) e entre as parcelas estudadas nas UPAs e na APA (B). Os números no eixo horizontal representam a distância de Bray-Curtis e, no eixo horizontal, as árvores que geraram os respectivos grupos. A correlação cofenética da classificação dos atributos do solo e da serapilheira foi 0,89 e das parcelas estudadas foi 0,99.



**FIGURA 18.** Dendrograma de classificação por análise de agrupamentos pelo método de ligação de médias ponderadas (WPGMA) e coeficiente de Bray-Curtis referente a: A) Atributos dos solos e da serapilheira. B) Parcelas das UPAs e da APA estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. (linha vermelha: nível de corte de 50% de dissimilaridade).

A análise de agrupamentos dos atributos dos solos e da serapilheira (FIGURA 18A) apresentou seis grupos distintos a um nível de corte de 50% de dissimilaridade. O primeiro grupo reuniu atributos físicos (densidade e RP) e químicos do solo ( $Al^{3+}$  e P), além dos teores de enxofre e carbono orgânico da serapilheira. Neste caso, o fósforo disponível no solo apresentou menor similaridade em relação às demais variáveis deste

grupo. O segundo grupo foi formado pelos teores de magnésio, fósforo e cálcio da serapilheira e os teores de cálcio e magnésio do solo, os quais apresentaram maior similaridade com o teor de cálcio da serapilheira.

O terceiro grupo incluiu a CTC do solo, o estoque de serapilheira e o teor de nitrogênio da serapilheira, enquanto o quarto grupo reuniu o estoque de carbono orgânico e a umidade volumétrica do solo. O quinto e o sexto grupo foram formados, separadamente, por matéria orgânica e teor de argila do solo.

Já na análise de agrupamentos das parcelas estudadas (FIGURA 18B) foi observada a formação de dois grupos distintos a um nível de corte de 50% de dissimilaridade. Um dos grupos foi formado apenas pela parcela P15 da UPA A1A (2003), enquanto o outro grupo maior reuniu as demais parcelas estudadas, o qual foi subdividido em dois grupos menores.

Por um lado, de modo geral, foram agrupadas as parcelas das UPAs exploradas anteriormente (2003 e 2005), enquanto no outro subgrupo foram reunidas as parcelas das UPAs mais recentemente exploradas (2007 e 2009) e da APA, não explorada. Assim, foi verificada maior similaridade entre parcelas da mesma UPA e entre UPAs exploradas em anos subsequentes, como a UPA DB1 (2007) e a UPA MV01 (2009). Além do mais, observou-se que a APA e a UPA MV01 (P21 e P22) apresentaram grande similaridade.

## **5. DISCUSSÃO**

### **5.1 ATRIBUTOS FÍSICOS DOS SOLOS DAS UPAs E DA APA**

O Latossolo Amarelo com textura argilosa estudado apresentou variações nos teores de argila (aumento de 525,0 a 800,0 g kg<sup>-1</sup>) e areia (diminuição de 392,0 a 125,0 g kg<sup>-1</sup>) ao longo da profundidade do solo, sem haver, porém, diferenças significativas ( $P > 0,05$ ). Isso já era esperado, pois, segundo Klein (2008), Latossolos apresentam, em geral, uniformidade textural em profundidade, sem variações significativas do teor de argila.

Em relação às áreas estudadas, a UPA explorada em 2003 apresentou alto teor de areia em uma de suas parcelas (P15); conseqüentemente, seu teor médio de argila foi significativamente inferior. Essa parcela, apesar de supostamente inserida no mesmo tipo de solo das demais áreas, de acordo com o mapa pedológico estudado antes da

coleta dos dados, estava localizada próxima a uma campinarana (Neossolo Quartzarênico), indicando, possivelmente, falha no levantamento ou no mapa pedológico da área de estudo. Assim, neste estudo, a parcela P15 apresentou um comportamento *outlier*.

Confirmando a alta correlação significativa verificada entre argila e umidade volumétrica, os menores teores de argila observados na UPA explorada em 2003 foram acompanhados dos menores teores de umidade. Hirai (2008) verificou, para umidade, diferença significativa entre ano de exploração e profundidade ( $P < 0,01$ ) em um Latossolo Amarelo, textura argilosa, em área de manejo florestal no Pará. Entretanto, no presente estudo, as demais UPAs e a APA não apresentaram diferenças significativas quanto a essa variável.

Em termos de densidade do solo, os valores encontrados neste estudo (1,50 a 1,83 g cm<sup>-3</sup>) foram superiores aos registrados por diversos autores. Ferreira et al. (2002) registraram, em um Latossolo Amarelo, textura argilosa, no Amazonas, valores entre 0,74 g cm<sup>-3</sup> (0-5 cm) e 1,10 g cm<sup>-3</sup> (20-30 cm) em parcela controle (explorada seletivamente 13 anos antes), além de valores entre 0,67 g cm<sup>-3</sup> (0-5 cm) e 1,19 g cm<sup>-3</sup> (20-30 cm) em parcelas manejadas (medidas pós-exploração). Mello-Ivo e Ross (2006), na mesma região, encontraram valores entre 0,75 e 0,82 g cm<sup>-3</sup>, nas profundidades de 0 a 3 cm e 4 a 7 cm, sendo inferiores aos observados no presente estudo. Já Corrêa (1984) registrou densidade entre 0,9 a 1,5 g cm<sup>-3</sup> em um Latossolo Amarelo, textura argilosa, cujo valor máximo coincide com os valores mínimos observados neste estudo. Deve-se levar em conta, porém, as diferentes máquinas utilizadas em cada exploração florestal.

De modo geral, houve aumento da densidade ao longo da profundidade do solo. Embora não tenha sido verificada diferença significativa entre as profundidades, nas camadas mais superficiais do solo foram registradas as menores densidades (exceto nas UPAs exploradas em 2003 e 2005), conforme observado por outros autores (FERREIRA et al., 2002; ALVES et al., 2005; MELLO-IVO; ROSS, 2006; IAREMA et al., 2011). As densidades do solo são geralmente mais altas em camadas mais profundas devido aos menores teores de matéria orgânica, à menor agregação do solo, à menor quantidade de raízes e à compactação causada pelas camadas mais superficiais do solo (LUIZÃO, 1989, BRADY; WEIL, 2008).

Neste estudo, os solos das UPAs apresentaram densidades médias significativamente diferentes entre si e inferiores à APA, conforme verificado por Ferreira et al. (2002). As menores densidades foram observadas em UPAs com maior

tempo pós-exploração, sendo possível verificar uma tendência de diminuição da densidade do solo de acordo com o aumento dos anos pós-exploração (2009 > 2007 > 2005 > 2003). Esses resultados corroboram os encontrados por Hirai (2008), que verificou diferença significativa entre as densidades dos solos em UPAs exploradas em 2000, 2003 e 2006, para um Latossolo Amarelo muito argiloso no Pará.

Além do mais, Martins et al. (1998), em um Latossolo Roxo sob floresta estacional semidecidual, concluíram que o tráfego de máquinas durante a exploração florestal promoveu aumentos na densidade do solo. Porém, Ferreira et al. (2002), ao avaliar as alterações físicas do solo causadas pela extração seletiva de madeira na Amazônia Central, concluíram que não houve alteração acentuada nas propriedades físicas do solo, tais como a densidade.

A alta densidade do solo verificada na APA (1,73 a 1,83 g cm<sup>-3</sup>) difere dos valores observados por outros autores. Mello-Ivo e Ross (2006), por exemplo, registraram valores entre 0,75 e 0,82 g cm<sup>3</sup> na área controle, também em um Latossolo Amarelo, textura argilosa, no Amazonas. Ademais, Souza et al. (2004), em um Latossolo Amarelo, textura argilosa, verificaram densidade do solo entre 1,09 e 1,19 g cm<sup>3</sup> na floresta controle.

Uma possível explicação para essa alta densidade pode ser a presença de uma mancha de Argissolo nessa área não explorada, já que Argissolos apresentam, naturalmente, maior densidade do solo (BRADY; WEIL, 2008). Outra explicação pode ser dada também em relação ao processo natural de formação do solo, com deposição de argila ou materiais coloidais, os quais ocupam espaços porosos e aumentam, assim, a densidade do solo. Além do mais, como solos com maior teor de matéria orgânica apresentam menor densidade (KLEIN, 2008), observa-se que na camada mais profunda do solo da APA, foi encontrado o segundo menor teor de matéria orgânica (24,0 g kg<sup>-1</sup>) e a maior densidade do solo (1,83 g cm<sup>-3</sup>).

Nove anos após a exploração florestal, a UPA A1A, com os menores teores de argila e umidade volumétrica, apresentou a menor densidade média do solo. Como nessa UPA a intensidade de exploração foi inferior, pode-se inferir que a intensidade do tráfego de máquinas e o número de árvores abatidas também foram inferiores. Ademais, nessa área foram registrados altos teores de matéria orgânica no solo, que apresenta capacidade de resiliência e confere qualidade física e química ao solo, minimizando os prováveis distúrbios causados pela exploração florestal.

Como a densidade e a porosidade total do solo são propriedades com elevada relação entre si (LOPES et al., 2011) e relacionadas com alterações no volume de solo, elas interferem diretamente na compactação do solo (REICHERT et al., 2007). Nesse sentido, a diminuição da porosidade total verificada ao longo da profundidade indicou, possivelmente, o surgimento de camadas compactadas (SOUZA et al., 2004), sendo indicativo do efeito do tráfego de máquinas na estrutura do solo (MARTINS et al., 1998). Geralmente, a redução da porosidade total ocorre com os macroporos, responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo, sendo os primeiros a sofrer diminuição do espaço poroso total no processo de compactação (REICHERT et al., 2007).

As UPAs exploradas em 2003 e 2005 e a APA apresentaram menor porosidade total na camada mais profunda do solo, enquanto as demais áreas apresentaram valores superiores na camada superficial. Conforme esperado, devido a relação inversa entre as variáveis, a APA, com a maior densidade do solo, apresentou a menor porosidade total, conforme observado por Alves et al. (2005) e Genro Junior (2002), ambos em Latossolo Vermelho.

### **5.1.1 Resistência do solo a penetração (RP)**

Em relação aos valores de RP registrados nas parcelas permanentes, observou-se que poucos foram superiores a 3,0 MPa, valor considerado limitante ao desenvolvimento de espécies florestais (USDA, 1983; ZOU et al., 2000). Da mesma forma, Hirai (2008) registrou valores de RP variando de 2,22 a 4,8 MPa em um Latossolo Amarelo muito argiloso sob floresta remanescente em área de manejo florestal no Pará. Porém, Mello-Ivo e Ross (2006) registraram valores de RP inferiores a 2,0 MPa em um Latossolo Amarelo sob floresta remanescente também em área de manejo florestal no Amazonas.

Os valores de RP registrados nas parcelas estudadas, segundo Misra et al. (1986), deveriam ser limitantes ao crescimento das raízes das plantas. De acordo com os autores, a pressão máxima que uma raiz pode exercer encontra-se entre 0,9 e 1,3 MPa, sendo que seu crescimento cessa em solo com RP entre 0,8 e 5,0 MPa (GREACEN et al., 1969). Esses valores variam devido às diferenças entre tipos de solo e espécies florestais, mas, em geral, as raízes cessam seu alongamento em solo com RP seis vezes maior que a máxima pressão axial que podem exercer (GREACEN, 1986).

Porém, há evidências de que o penetrômetro de impacto superestima o valor da RP de duas a oito vezes, dependendo do tipo de solo (CAMARGO; ALLEONI 1997). Além disso, segundo os autores, a resistência ao penetrômetro é influenciada pela textura do solo; portanto, suas medidas devem ser feitas em um mesmo tipo de solo com o mesmo teor de umidade. Assim, pressupõe-se que os elevados valores de RP registrados a certas profundidades do solo no presente estudo possam ter sido superestimados pelo uso deste equipamento para determinação da RP.

O número de impactos necessários para penetração é maior quanto menor for o conteúdo de água no solo, ou seja, quanto mais seco estiver o solo, maior será sua resistência a penetração (PIRES et al., 1991). Na APA, por exemplo, foi registrado valor máximo de 3,25 MPa entre 25 e 30 cm de profundidade, porém a 36,9% de umidade, que, apesar de só diferir estatisticamente da UPA A1A, foi o segundo menor teor de umidade dentre as áreas estudadas. Dessa forma, na APA, não haveria, necessariamente, uma limitação ao desenvolvimento radicular das espécies florestais presentes nessa área em relação à disponibilidade de água disponível para as plantas.

De modo geral, as parcelas das UPAs apresentaram valores de RP mais altos para a faixa de 20-40 cm, os quais foram mais acentuados na UPA explorada em 2009; porém, o mesmo comportamento não foi observado nas parcelas da APA. Essa camada do solo representa uma zona possivelmente compactada pelo tráfego de máquinas durante a exploração florestal (STOLF, 1987).

Os valores de RP mais elevados encontrados nas parcelas permanentes (3,50 MPa) e nas trilhas de arraste (4,80 MPa) da UPA mais recentemente explorada (2009) indicam perturbações que o solo sofreu devido à movimentação de tratores de esteira D6 e *skidder* nas operações envolvidas na exploração florestal e transporte das toras das árvores extraídas nesta UPA. De acordo com o histórico da exploração florestal da empresa, nessa UPA, a intensidade de exploração foi superior às demais UPAs estudadas.

Os menores valores de RP verificados nas UPAs exploradas em 2003, 2005 e 2007 indicam a capacidade de resiliência desses solos com o passar dos anos, em grande parte explicada pelo alto teor de matéria orgânica constatado, já que se trata de um dos melhores indicadores da qualidade físico-química do solo (MIELNICZUK, 2008). Segundo Arnup (1998), a matéria orgânica possui propriedades elásticas e pode retornar a condições prévias após compactação do solo. Além disso, a intensidade de exploração das UPAs exploradas em 2003 e 2007 foram inferiores a 14 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, valores

considerados baixos dentro do PMFS Pleno (VERÍSSIMO et al., 2002; PINTO et al., 2002).

De modo geral, os valores de RP nas parcelas das UPAs foram semelhantes aos obtidos na APA, com exceção das camadas mais profundas da UPA explorada em 2009. Porém, como não foi verificada diferença significativa, esses resultados corroboram Hendrinson (1989), em área de manejo florestal no Suriname, que observou RP semelhante àquela de solos não perturbados. Além do mais, tal fato pode ser explicado pelo elevado teor de matéria orgânica e materiais não-decompostos presentes no solo, bem como, possivelmente, pela etapa de pré-arraste realizada pela empresa, diminuindo o possível impacto causado pela abertura e uso de outras trilhas de arraste nas UPAs.

Os valores médios de RP registrados para as trilhas de arraste estudadas estão de acordo com valores encontrados por Hirai (2008) em uma floresta de terra firme no Pará. A autora registrou valores entre 2,17 e 6,07 MPa e concluiu que trilhas de arraste e pátios de estocagem foram os locais que mais sofreram a influência da passagem do *skidder* e de toras retiradas.

Com exceção das UPAs exploradas em 2005 e 2009, as demais apresentaram valores de RP no centro da trilha semelhantes aos valores verificados nas parcelas permanentes, porém há pouca possibilidade de regeneração da vegetação ao estado antes-exploração a longo prazo. Hendrinson (1989), por exemplo, verificou que, com oito anos pós-exploração, a camada superficial do solo nas trilhas de arraste ainda estava compactada, apesar de parcialmente coberta pela vegetação. Segundo o autor, a vegetação era constituída, na maior parte, de arbustos de 2 a 6 m de altura e, em menor quantidade, de ervas e mudas, o que indica certo grau de seletividade das espécies que têm possibilidade de se desenvolver nessas condições. O mesmo foi observado neste estudo para as trilhas das UPAs exploradas em 2003, 2005 e 2007.

Hirai (2008) constatou que é necessário um longo período de observação para a avaliação dos efeitos da compactação no crescimento da regeneração. Alexander (2012), em uma floresta densa sempre verde em Gana, verificou que as trilhas de arraste levaram em média 22 anos para recuperar a resistência a penetração natural. Porém, os valores de RP no centro das trilhas aqui estudadas, com um máximo de nove anos pós-exploração, não foram, em princípio, limitantes ao desenvolvimento de raízes de certas espécies pioneiras. Já na zona de rodagem das trilhas de arraste, com valores ultrapassando 4,0 MPa, não foi observada essa mesma situação, conforme verificado por Woodward (1995).

Na área de rodagem do *skidder* foi observada menor quantidade de regeneração natural, com a presença de sulcos e deformação no solo como consequência da movimentação da máquina durante a operação de arraste. Da mesma forma, Mello-Ivo e Ross (2006) concluíram que as trilhas de arraste, juntamente com os pátios de estocagem, foram as áreas mais afetadas pela colheita seletiva de madeira, conforme verificado neste estudo.

Quanto aos pátios de estocagem de madeira, observou-se, de modo geral, RP muito elevada em todas as UPAs, conforme verificado por Iarema et al. (2011) em área de manejo florestal no Mato Grosso, os quais não verificaram evidência de recuperação das propriedades físicas dos solos de pátios explorados em 1995, 1997, 2000 e 2003 com o tempo de abandono. Os valores médios de RP na UPA explorada em 2009 não ultrapassaram 6,0 MPa, enquanto as demais UPAs obtiveram valores de até 10,0 MPa em certas profundidades, todos considerados limitantes ao crescimento de raízes de espécies florestais (USDA, 1993). Essa elevada RP é reflexo da intensa movimentação do *skidder* e da empilhadeira na área do pátio. Além disso, deve-se levar em conta o peso e o esforço exercido pela própria madeira estocada durante o período da exploração florestal, também levando em conta os diferentes volumes das diferentes espécies exploradas em cada UPA.

A RP mais baixa registrada na UPA explorada em 2009 corrobora os valores encontrados por Hirai (2008), com RP máxima em pátios de UPAs exploradas em 2000, 2003 e 2006 por volta de 6,0 MPa. Iarema et al. (2011), porém, registraram valores muito altos de RP (~10 MPa) nos pátios de estocagem amostrados em área de exploração madeireira certificada pelo FSC em Mato Grosso (Latosolo Vermelho-Amarelo).

## **5.2 ATRIBUTOS QUÍMICOS DOS SOLOS DAS UPAs E DA APA**

### **5.2.1 Avaliação da acidez e fertilidade do solo**

De modo geral, os solos das áreas estudadas demonstraram alta acidez e baixa fertilidade, com baixos percentuais de saturação por bases e altos percentuais de saturação por alumínio. Trata-se, assim, de um Latossolo Amarelo distrófico e álico (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Esses resultados, segundo Marques et al. (2004) estão de

acordo com as propriedades químicas dos Latossolos Amarelos Distróficos da região Amazônica.

A variação de pH observada neste estudo corrobora os valores encontrados por Biot et al. (1997) e por Neu (2005), no mesmo tipo de solo na região de Manaus. Porém, Hirai (2008), em Latossolo Amarelo no Pará, observou valores superiores de pH também em área de manejo florestal.

O baixo pH aliado à elevada acidez trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) e potencial ( $\text{H}+\text{Al}$ ), indica haver possíveis restrições à nutrição das plantas em virtude da menor disponibilidade de nutrientes e pela toxidez causada pelo  $\text{Al}^{3+}$ . Entretanto, julga-se que as espécies florestais nativas da Amazônia estão adaptadas às condições minerais desses solos, não refletindo em menor crescimento e desenvolvimento das plantas nativas (SILVA, 2003), conforme verificado pela floresta densa e com árvores de grande porte presentes no local de estudo.

Cerca de 70% dos solos da Amazônia são classificados como ácidos e apresentam toxicidade causada pelo alumínio trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) (COCHRANE; SANCHEZ, 1982). A elevada acidez constatada neste estudo é reflexo da mineralogia do solo, com predomínio de caulinita, óxidos de ferro e alumínio, e da presença de matéria orgânica, que fornecem ao solo grande quantidade de íons  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ , promovendo a acidez (PEREIRA et al., 2000).

Quanto ao teor de  $\text{Al}^{3+}$ , sua diminuição ao longo da profundidade também foi observada por Silveira (2012), na mesma floresta de terra firme. O nível de  $\text{Al}^{3+}$  na solução do solo depende do pH do solo, da saturação por alumínio, do teor de matéria orgânica e da presença de outros íons na solução do solo (ALVAREZ et al., 1996). O mesmo foi observado neste estudo, já que o teor de  $\text{Al}^{3+}$  registrado na UPA B1B (2005), significativamente mais alto, foi acompanhado de maiores teores de matéria orgânica, acidez potencial ( $\text{H}+\text{Al}$ ), cálcio e magnésio ( $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ ), CTC e saturação por bases (V) (TABELA 3).

A baixa CTC dos solos estudados corrobora os resultados encontrados por Silveira (2012) e Iarema et al. (2011), mas Longo e Espíndola (2000) verificaram valores superiores em um Latossolo Vermelho-Amarelo em Rondônia. Mesmo sem apresentar diferenças significativas entre profundidades, a camada superficial de 0 a 10 cm apresentou CTC mais elevada em todas as áreas, conforme observado por Alfaia (1988). Isso pode ser explicado, provavelmente, pelo elevado teor de matéria orgânica

encontrado nessa camada, além das expressivas contribuições de  $H^+$  e  $Al^{3+}$ , elementos ligados à acidez do solo (LONGO; ESPÍNDOLA, 2000).

Os teores de P registrados neste estudo (0,33 a 12,03 mg dm<sup>-3</sup>), classificados como muito baixos (TOMÉ JÚNIOR, 1997), corroboram os valores encontrados por Silveira (2012) em Latossolo Amarelo e Iarema et al. (2001) em Latossolo Vermelho-Amarelo sob floresta primária no Mato Grosso. Entretanto, foram inferiores aos observados por Araújo et al. (2004) em um Argissolo Amarelo distrófico na Amazônia. O fósforo disponível no solo, de modo geral, pode ser considerado o elemento mais crítico em sistemas florestais amazônicos, sendo deficiente em 90% desses solos, seguido de N e K (PEREIRA et al., 2000).

Segundo Santos et al. (2008), a quantidade da fração lábil (disponível) de P depende do grau de intemperismo do material de origem do solo, das características químicas, físicas e da atividade biológica do solo, bem como da vegetação predominante que utiliza o nutriente. Em ecossistemas com baixa disponibilidade de P, conforme verificado nos solos estudados, as plantas e microrganismos são capazes de absorver o P a partir de baixas concentrações na solução do solo (SANTOS et al., 2008). Dentre os diversos mecanismos desenvolvidos nesse sentido destacam-se as associações das plantas com organismos (micorrizas), que sincronizam sua taxa de crescimento à disponibilidade do nutriente, maximizando a biociclagem das formas orgânicas do P (RHEINHEIMER; KAMINSKI, 1994).

Observou-se acúmulo de P e K na superfície do solo nas UPAs exploradas em 2003 e 2005. O mesmo foi observado por Longo e Espíndola (2000), que encontraram teores mais elevados desses nutrientes nas camadas superficiais do Latossolo estudado. Segundo Tome Júnior (1997), o P disponível tende a diminuir com a profundidade, acompanhando o teor de matéria orgânica.

Os altos teores de P e K na camada superficial da UPA explorada em 2003 podem ser explicados pelos altos teores de MO nessa camada, cuja decomposição aumenta a disponibilidade desses nutrientes (PEREIRA et al., 2000). Além disso, a decomposição da MO produz ácidos orgânicos, que dissolvem compostos de P encontrados em formas insolúveis na solução do solo (COELHO; VERLENGIA, 1973).

Apesar de os teores de P e K obtidos nas UPAs não terem diferido estatisticamente entre si e daqueles registrados na APA, essa última apresentou teores mais elevados, com teor de K considerado alto e teor de P baixo na camada mais profunda (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Embora Falesi (1976) tenha verificado que o teor de

fósforo disponível na camada superficial do solo normalmente cai drasticamente com o tempo, após o estabelecimento da floresta perturbada, no presente estudo houve aumento desse teor no solo ao longo dos anos pós-exploração (2009 < 2007 < 2005 < 2003). Higuchi et al. (1997) também verificaram aumento no teor desse nutriente em floresta de terra firme próxima à Manaus.

Os baixos teores de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  registrados nos solos das áreas estudadas corroboram Longo e Espíndola (2000), na Amazônia Central. Houve tendência de aumento desses nutrientes de acordo com o aumento do tempo pós-exploração, também observado por Higuchi et al. (1997). Sete anos após a exploração (UPA DB1), foi observado o maior teor médio de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  e também de matéria orgânica. Provavelmente esses resultados se devem à taxa de mineralização da matéria orgânica, provocando a liberação de nutrientes no solo, entre eles, o cálcio e, em menor quantidade, o magnésio (PEREIRA et al., 2000).

Segundo Ferreira et al. (2001), a exploração seletiva de madeira aumentará os teores de nutrientes nas camadas superficiais do solo em virtude da decomposição dos resíduos deixados durante a exploração florestal (folhas e galhos). Ferreira et al. (2006), em uma floresta de terra firme na Amazônia Central submetida à extração seletiva de madeira ( $34 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ), verificaram que os teores de K,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e Na mostraram aumentos significativos após a exploração. Neste estudo, o aumento no teor de nutrientes ao longo do tempo pós-exploração foi verificado para o P, K, Na e  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ , sendo significativo somente para o último.

### **5.2.2 Matéria orgânica (MO) e carbono orgânico (CO)**

Os teores de MO registrados neste estudo (20,6 a  $64,1 \text{ g kg}^{-1}$ ) corroboram os resultados de outros estudos na Amazônia. Silveira (2012) registrou teores de MO entre  $38,3 \text{ g kg}^{-1}$  (0-20 cm) e  $25,6 \text{ g kg}^{-1}$  (20-40 cm) em floresta de terra firme na mesma área de estudo. Hirai (2008), em floresta de terra firme no Pará, registrou valores de MO entre 44,3 e  $43,4 \text{ g kg}^{-1}$  na camada de 0 a 10 cm de profundidade. Salimon et al. (2007) registraram teor de MO entre  $74,0 \text{ g kg}^{-1}$  (0-10 cm) e  $20 \text{ g kg}^{-1}$  (20-30 cm) em floresta primária no Acre. Já Marques (2004) registraram variação no teor de MO do solo de  $51,7 \text{ g kg}^{-1}$  (camada superficial) a  $17,24 \text{ g kg}^{-1}$  (40 cm de profundidade) em um Latossolo Amarelo distrófico sob floresta de platô na Amazônia Central.

Considerados médios e altos (TOMÉ JÚNIOR, 1997), os teores de MO encontrados foram os motivos pelos quais não resultou mudanças marcantes nos atributos físicos e químicos dos solos. Isso pode ser explicado devido ao fato de a MO apresentar e conferir resiliência aos solos (MIELNICZUK, 2008). Os teores de MO mais elevados na camada superficial decorrem provavelmente do maior aporte de resíduos florestais que compõem a serapilheira (folhas, galhos e casca), que promove maiores modificações nessa camada (SOUZA et al., 2004; RANGEL; SILVA, 2007). Além disso, o teor de MO sempre diminui com a profundidade (TOMÉ JÚNIOR, 1997; BRADY; WEIL, 2008).

A UPA A1A (2003) apresentou teor de MO significativamente inferior devido aos valores de MO inferiores verificados na parcela P15, alocada sobre solo com maior fração areia. O teor de MO nessa área variou de 23 g kg<sup>-1</sup> (0 a 10 cm) a 20 g kg<sup>-1</sup> (30-50 cm), enquanto as demais parcelas estudadas nessa UPA registraram teores de MO semelhantes aos das outras UPAs. Entretanto, na camada mais profunda de todas as parcelas da UPA A1A foram registrados valores inferiores de MO, que também contribuíram para a baixa média geral nessa camada (APÊNDICE B).

O segundo menor valor médio de MO verificado na APA (24,08 g kg<sup>-1</sup>), mesmo que não tenha sido significativamente inferior às UPAs, com exceção da A1A, corrobora o estudo de Hirai (2008). A autora concluiu que a exploração seletiva de madeira aumenta o material orgânico novo no solo (folhas e galhos), além do teor de carbono no solo. Além disso, possíveis diferenças quanto à temperatura do solo, relacionadas a abertura de clareiras decorrentes da exploração florestal, entre as áreas exploradas e a não explorada podem ter afetado o teor de MO no solo, já que o processo de decomposição da serapilheira do solo é acelerado com o aumento da temperatura (CORREIA; ANDRADE, 2008).

Neste estudo, não houve perda de matéria orgânica ao longo do tempo de abandono das UPAs após a exploração florestal. Pelo contrário, foi encontrada mais matéria orgânica no solo com sete anos pós-exploração (UPA B1B explorada em 2005) que no solo com três anos pós-exploração (UPA MV01 explorada em 2009). Assim, verifica-se que as altas taxas de decomposição da MO estão sendo contrabalanceadas pela adição de maiores quantidades de carbono pela vegetação. Essas quantidades devem ser bastante altas, já que as condições climáticas são bastante favoráveis à decomposição microbiana (alta temperatura e umidade) (BAYER; MIELNICZUK, 2008).

Como a MO é considerada um indicador chave da qualidade do solo, por ser muito sensível a práticas de manejo do solo, bem como por sua forte relação com a maioria dos atributos do solo (BRADY; WEIL, 2008) e do ambiente relacionados ao solo (MIELNICZUK, 2008), seus altos teores na camada superficial do solo neste estudo indicam que a exploração florestal realizada nas UPAs, com destaque para a etapa de pré-arraste, não comprometeu a qualidade física e química do solo sob a floresta remanescente. Nas florestas tropicais, de modo geral, observa-se uma maior estabilidade da fração orgânica à decomposição pelos microrganismos, pela presença, na fração argila, de óxidos de ferro e alumínio, além de caulinita, os quais interagem com a MO do solo e conferem a esse atributo alta estabilidade química, sendo pouco afetado por práticas de manejo do solo (BAYER; MIELNICZUK, 2008).

Em relação aos teores de CO do solo, os valores médios registrados neste estudo (11,9 a 37, 2 g kg<sup>-1</sup>) foram semelhantes aos encontrados por Hirai (2008), que identificou variação do teor de C entre 27,8 g kg<sup>-1</sup> (UPA explorada em 2000) e 32,6 g kg<sup>-1</sup> (UPA explorada em 2006) na camada superficial de um Latossolo Amarelo sob floresta remanescente. Porém, foram inferiores aos registrados por Iarema et al. (2011), em Latossolo Vermelho-Amarelo sob floresta nativa no Mato Grosso, e Araújo et al. (2004) em Argissolo Amarelo distrófico sob floresta nativa no Acre, com teores de CO entre 43 g kg<sup>-1</sup> (0 a 20 cm) e 57,5 g kg<sup>-1</sup> (30 a 60 cm).

O menor teor de CO da UPA A1A (2003) também ocorreu pelo mesmo motivo explicado para o teor de MO. Além disso, o aumento do teor de CO em solos argilosos se deve às características dos minerais de argila, podendo ser apontado como um importante fator de proteção física do CO (TELLES, 2003). Segundo Neu (2005), os solos arenosos que não apresentam essa proteção física possuem pequena capacidade de adsorção do CO e as concentrações encontradas tornam-se menores.

Adicionalmente, perdas de CO também podem ser atribuídas à destruição de macroagregados e subsequente mineralização do carbono orgânico lábil (ELLIOTT, 1986). Essas perdas ocorrem, principalmente, pela liberação de CO<sub>2</sub> na respiração, pela decomposição microbiana dos resíduos florestais e da matéria orgânica, além das perdas da decomposição orgânica, por lixiviação e erosão (MIELNICZUK, 2008).

Segundo Doran (1997), a perturbação antrópica do sistema estável (solo + cobertura vegetal), normalmente, causa mais perdas do que ganhos de carbono, implicando a redução do seu teor ao longo do tempo e uma possível degradação do solo no desempenho de suas funções básicas. Entretanto, neste estudo, não foi verificado um

padrão definido de aumento ou diminuição do CO ao longo dos anos pós-exploração, bem como o teor de CO da área não explorada não diferiu estatisticamente das áreas exploradas.

### 5.2.3 Estoque de carbono orgânico (ECO)

O estoque de carbono orgânico (ECO) médio registrado neste estudo ( $54,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) corrobora os valores registrados por outros estudos sob mesma metodologia para estimação essa variável. Mafra et al. (2008), por exemplo, verificou estoque de carbono orgânico em Nitossolo háplico sob mata de araucária entre  $26,3 \text{ Mg ha}^{-1}$  (0-10 cm) e  $53,3 \text{ Mg ha}^{-1}$  (20-40 cm). Por outro lado, Salimon et al. (2007) verificaram valores entre  $18,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (0-10 cm) e  $45 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (50-60 cm) em floresta primária no Acre, cuja variação foi inferior à observada neste estudo.

Da mesma forma, Usuga et al. (2010), cujo estudo identificou variação no ECO em solo de baixa fertilidade sob plantio de *Tectona grandis* na Colômbia (com idade entre 10 e 17 anos) entre  $17 \text{ Mg ha}^{-1}$  (25-50 cm) e  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$  (0-25 cm), também inferior aos valores aqui registrados. Segundo Rangel e Silva (2007), o ECO do solo variou de  $34,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  (0-10 cm) a  $40,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  (20-40 cm) em um Latossolo Vermelho distroférico em Lavras (MG).

Ao contrário de Hirai (2008), que registrou variação de ECO de 30 a  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$  em Latossolo Amarelo no Pará, calculado a partir da metodologia de Machado (2005), neste estudo foram verificadas diferenças significativas no ECO entre as áreas e profundidades estudadas. Como a densidade do solo é considerada na estimação do estoque de carbono orgânico, de acordo com a equação utilizada neste e em diversos estudos (VELDKAMP, 1994; FERNANDES; FERNANDES, 2008; USUGA et al., 2010), os menores e maiores valores de ECO foram verificados em áreas com menores e maiores densidades do solo, respectivamente. Além do mais, o tipo de solo e a textura influenciam muito na retenção do carbono no solo, de maneira que solos argilosos fixam mais carbono.

Mudanças no uso da terra alteram os processos biogeoquímicos do solo, com reflexos no estoque de CO e no fluxo de gases entre o solo e a atmosfera. Dependendo das características da área e do sistema de manejo adotado, essas alterações podem representar uma mudança no papel do solo como reservatório de C, alterando as taxas de emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ). As emissões líquidas desses

gases estão associadas com as mudanças nas quantidades do C estocado (FERNANDES; FERNANDES, 2008). No solo é onde se armazena a maior quantidade de carbono na floresta (FEARNSIDE; BARBOSA, 1998; SCHULP et al., 2008; SIERRA et al., 2007).

As variações registradas no ECO do solo entre as UPAs também indicam a importância e a alta heterogeneidade no carbono orgânico do solo, provavelmente associada com alguma variabilidade na topografia, rocha matriz, profundidade do solo e microclima, em escala local (USUGA et al., 2010). Além disso, segundo os autores, o estoque de carbono orgânico do solo varia entre as espécies florestais, sendo também condicionado pelos históricos de uso da terra. Neste caso, todas as áreas estudadas eram florestas primárias antes da exploração florestal.

### **5.3 ORDENAÇÃO DAS UPAs E DA APA EM RELAÇÃO AOS ATRIBUTOS DOS SOLOS**

A ordenação das áreas estudadas por vetores dos atributos físicos e químicos do solo indicou que  $Al^{3+}$ , CTC e  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  apresentaram alta correlação positiva entre si e correlacionaram-se negativamente com MO, RP e Ds, que também apresentaram alta correlação entre si, principalmente RP e Ds. Além disso, ECO, teor de argila (Arg) e umidade volumétrica (Uv) correlacionaram-se positivamente entre si e apresentaram correlação negativa com P (FIGURA 15).

O autovalor do primeiro componente (3,31) indicou que pelos menos quatro variáveis do solo explicam a variância dos dados, no eixo desse componente. Neste caso, essas variáveis foram: CTC,  $Al^{3+}$ , MO e RP, com coeficientes de correlação e autovetores mais elevados. Por outro lado, o autovalor do segundo componente (2,77) indicou que pelo menos três variáveis explicam a variância dos dados, sendo elas: ECO, Uv e teor de argila. Essas variáveis também apresentaram maiores coeficientes de correlação e autovetores nesse componente, indicando forte significado ecológico na determinação da variação dos dados (FELFILI et al., 2011).

Assim, de acordo com o eixo do componente principal 1, pode-se dizer que, positivamente, a acidez do solo ( $Al^{3+}$  e CTC) apresentou maior contribuição na explicação da variação dos dados da camada superficial dos solos das áreas estudadas (exceto a UPA A1A). Essas variáveis são altamente correlacionadas, pois a CTC corresponde ao total de cargas negativas que o solo apresenta; sendo assim, o alumínio

trocável é utilizado na soma da CTC total do solo (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Nessa camada, os valores de  $Al^{3+}$  e H+Al foram significativamente superiores (TABELA 3).

Negativamente, nesse eixo, as variáveis que melhor explicaram a variância dos dados da camada mais profunda dos solos das áreas estudadas (exceto a UPA A1A) incluem os atributos físicos relacionados à compactação do solo: resistência a penetração, densidade do solo e teor de matéria orgânica. As duas primeiras variáveis apresentaram correlação positiva significativa neste estudo. Já a MO apresentou alta correlação negativa com acidez do solo, conforme verificado no diagrama de ordenação (FIGURA 15). A MO, como um atributo que confere qualidade física e química ao solo (MIELCNIZUK, 2008), também está relacionada à sua compactação.

Como as áreas mais próximas no diagrama apresentaram maior correlação entre si e com a variável (seta), as UPAs MV01 e DB1 e a APA (camadas mais profundas), obtiveram alta correlação entre si e em relação a Ds e RP, principalmente. A camada mais profunda da UPA B1B também correlacionou-se com RP e DS, porém essa correlação foi menor que a das áreas citadas. Em todas essas áreas os valores de densidade do solo foram elevados (TABELA 2).

No eixo do segundo componente principal, umidade volumétrica ( $U_v$ ), teor de argila (Arg) e o estoque de carbono orgânico (ECO) do solo apresentaram maior contribuição positiva na explicação da variação dos dados. Neste estudo, os teores de umidade e argila apresentaram correlação altamente positiva, enquanto o estoque de carbono orgânico também apresentou alta similaridade com a umidade volumétrica, conforme verificado na análise de agrupamentos (FIGURA 18A). No lado positivo desse eixo, a camada de 10 a 30 cm da UPA B1B apresentou maior correlação com  $U_v$ , enquanto a mesma camada da UPA DB1 correlacionou-se com ECO e a da MV01 com densidade do solo.

Por outro lado, no lado negativo desse eixo, o teor de fósforo (P) foi o atributo químico que melhor explicou a variação dos dados. A essa variável se correlacionou a camada superficial da UPA A1A (2003), cujo teor médio de fósforo foi o mais elevado neste estudo (TABELA 3). As demais camadas dessa UPA correlacionaram-se negativamente com  $U_v$  e teor de argila.

De modo geral, todas as áreas estudadas apresentaram uma variação interna entre as profundidades estudadas quanto aos atributos do solo analisados neste estudo, principalmente entre a camada superficial e as mais profundas. Isso ocorreu, provavelmente, devido à maior quantidade de matéria orgânica presente na camada

superficial, que indica maior CTC total, maior resistência à variação do pH, maior disponibilidade de nutrientes para as plantas e melhor qualidade física do solo (BRADY; WEIL, 2008; TOMÉ JÚNIOR, 1997; MIELCNIZUK, 2008).

#### **5.4 BIOMASSA E NUTRIENTES DAS SERAPILHEIRAS DAS UPAs E DA APA**

Os valores médios de estoque de serapilheira encontrados neste estudo (4,14 a 10,06 Mg ha<sup>-1</sup>) corroboram os valores registrados por Teixeira et al. (2001) em floresta primária no Pará, Hirai (2008) em floresta sob manejo florestal no Pará, bem como Dantas e Phillipson (1989), os quais verificaram produção anual média de 8,01 Mg ha<sup>-1</sup> em floresta primária e 5,04 Mg ha<sup>-1</sup> em floresta secundária sobre Latossolo Amarelo no Pará. Porém, Selva et al. (2007) registraram produção anual de serapilheira em floresta primária de terra firme, no sul da Amazônia, de 11,8 Mg ha<sup>-1</sup>, valor superior ao registrado na área não explorada do presente estudo.

Deve-se considerar, contudo, que a falta de uma metodologia padronizada no estudo de serapilheira (*litterfall*) também acarreta diferenças nos valores de sua biomassa, dificultando sua comparação entre ecossistemas (PROCTOR, 1983). Isso ocorre porque alguns trabalhos consideram apenas as folhas para avaliar o aporte de serapilheira, enquanto outros incluem folhas, estruturas reprodutivas e galhos finos, além de galhos grossos e restos e fezes de animais.

A biomassa significativamente superior registrada na UPA explorada em 2003 pode ser explicada, em parte, pelo alto valor encontrado na parcela P15, já que há maior acúmulo de serapilheira sobre solo com maior fração areia, devido à sua menor velocidade de decomposição nesse tipo de solo (CORREIA; ANDRADE, 2008). Por outro lado, as demais parcelas dessa UPA, sobre solo argiloso, apresentaram estoque de serapilheira elevado. Desse modo, houve realmente tendência de aumento no estoque de serapilheira com o aumento dos anos pós-exploração. Hirai (2008), porém, verificou uma redução no estoque de serapilheira com o decorrer dos anos pós-exploração.

A maior biomassa de serapilheira encontrada nas UPAs em relação à APA corrobora Hirai (2008) e Biot et al. (1997). Essas diferenças podem ser explicadas pelos vários fatores que afetam a quantidade de resíduos que caem da parte aérea das plantas, como as características genéticas e idade das espécies florestais presentes no local, bem como a densidade da floresta (NEVES et al., 2001; CORREIA; ANDRADE, 2008). Em outras palavras, nessa tipologia florestal há uma alta heterogeneidade espacial local.

Além disso, pressupõe-se que a abertura de clareiras devido à construção de estradas, trilhas de arraste e abate de árvores tenha alguma relação com a velocidade de decomposição da serapilheira nas UPAs. Quanto menor sua velocidade de decomposição, maior será a camada de serapilheira (CORREIA; ANDRADE, 2008). A presença de serapilheira nas UPAs melhora as condições para germinação de sementes e sobrevivência de plântulas, primeiro estágio da regeneração natural, ao proteger o solo da insolação direta (MARTINS; RODRIGUES, 1999).

Em relação aos nutrientes da serapilheira, de maneira geral, os teores de CO, N e K nas serapilheiras das áreas estudadas foram mais elevados em relação aos teores de Ca, S, Mg, e P, em ordem decrescente de grandeza. Porém, somente os teores de K, Ca e CO foram significativamente diferentes entre as áreas estudadas. Neves et al. (2011) verificaram diferença estatisticamente significativa entre *Ceiba pentandra* e *Virola surinamensis* quanto aos teores de N, P, K, Mg e S na serapilheira depositada. Segundo os autores, como ambas as espécies foram plantadas em solos com disponibilidade semelhante de macronutrientes, o menor teor desses elementos na serapilheira de *Virola* pode ser atribuído à sua menor capacidade de absorção.

Os teores de N ( $14,26 \text{ g kg}^{-1}$ ) e P ( $0,58 \text{ g kg}^{-1}$ ) superiores e os de K ( $4,21 \text{ g kg}^{-1}$ ) e CO ( $137,0 \text{ g kg}^{-1}$ ) significativamente superiores na serapilheira da APA podem ser explicados pelo *status* sucessional da floresta e pela composição de espécies vegetais presentes nessa área, os quais interferem na ciclagem de nutrientes (VITOUSEK; SANFORD, 1986). Silveira (2012), na mesma floresta de terra firme estudada, verificou que os teores de N, P, K, S e Mg nas folhas das árvores foram maiores em relação às outras partes arbóreas, devido à sua maior atividade fisiológica comparada às outras partes da árvore (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

A concentração e o conteúdo de nutrientes na serapilheira variam em função da vegetação, da densidade populacional, da habilidade da espécie em absorver, utilizar e redistribuir os nutrientes, do habitat natural e da idade das árvores (NEVES et al., 2001). De acordo com Correia e Andrade (2008), é incomum encontrar dois metros quadrados de serapilheira com as mesmas características em uma floresta tropical, tais como quantidade acumulada, concentração de nutrientes, lignina, polifenóis, entre outros.

Além do mais, o conteúdo de nutrientes da serapilheira varia segundo sua fração analisada. As folhas detêm as maiores concentrações de Ca e Mg, enquanto a fração composta por flores, frutos e sementes caracteriza-se pelos altos conteúdos de P e K

(CUNHA et al., 1993). As folhas, em geral, estão em maior proporção e apresentam a maior taxa de decomposição (FASSBENDER, 1993; SELVA et al., 2007).

As serapilheiras amostradas neste estudo, formadas a partir da queda de resíduos senescentes da parte aérea das espécies florestais presentes no local, têm papel fundamental na manutenção da sustentabilidade desta floresta, principalmente pela baixa fertilidade natural verificada no solo estudado. A gradativa decomposição dessas serapilheiras pode ser responsável pelo retorno de quantidades significativas de nutrientes ao solo, pela eficiente ciclagem de nutrientes em que as perdas de elementos são muito pequenas (CORREIA; ANDRADE, 2008). Ademais, a floresta estudada pode apresentar mecanismos capazes de conservar nutrientes, como sua absorção diretamente da serapilheira através de interações entre fungos e raízes (simbioses mutualísticas) (HERRERA et al., 1998).

## **5.5 ORDENAÇÃO DAS UPAs E APA EM RELAÇÃO AOS ATRIBUTOS DA SERAPILHEIRA**

O autovalor do componente principal 1 (2,68) indicou que pelos menos três atributos da serapilheira explicam a variância dos dados no eixo desse componente. Neste caso, essas variáveis foram: Mg, Ca e estoque de serapilheira, os quais apresentaram coeficientes de correlação e autovetores mais elevados. Por outro lado, o autovalor do segundo componente principal (1,75) indicou que pelo menos duas variáveis explicam a variância dos dados, sendo elas P e CO. Essas variáveis também apresentaram maiores coeficientes de correlação e autovetores ( $> 0,3$ ) nesse componente (FELFILI et al., 2007).

Portanto, de modo geral, a partir da ordenação das áreas (FIGURA 18) foi possível inferir que a APA, considerada como área controle, apresentou maior correlação positiva com os teores de Mg (APA-1), CO (APA-2) e N (APA-3) da serapilheira. Esses nutrientes apresentaram teores elevados nas serapilheiras amostradas nessa área, principalmente N, com o teor mais elevado dentre todas as áreas. Dentre essas três parcelas da APA, somente a APA-1 se correlacionou com UPAs (MV01, B1B e DB1).

A UPA A1A, explorada em 2003, apresentou maior correlação positiva com Mg (P15), N (P7) e S (P6). Na parcela P15 o teor de magnésio na serapilheira foi o menor dentre todas as parcelas, enquanto as parcelas P7 e P6 apresentaram altos teores de N e

S na respectiva serapilheira. Somente uma parcela dessa UPA se correlacionou com outra UPA (DB1), em relação ao teor de S da serapilheira (APÊNDICE C).

A UPA B1B, explorada em 2005, apresentou duas parcelas mais correlacionadas com o teor de S (P2 e P3), enquanto a parcela P1 se correlacionou com o teor de Mg. Essa última parcela, na qual foi observado o maior teor de Mg dentre todas as parcelas, apresentou correlação com parcelas da APA e das UPAs MV01 e DB1. Por outro lado, as parcelas P2 e P3, com altos teores de S em sua serapilheira, apresentaram-se mais isoladas das outras áreas no diagrama de ordenação.

Na UPA DB1, explorada em 2007, os teores de S e N apresentaram maior importância. No caso, somente a parcela P19 se correlacionou com S, enquanto a parcela P8 não apresentou alta correlação com nenhum nutriente e a P17 apresentou alta correlação negativa com o teor de N. Nessa última parcela, foi verificado o menor teor de N dentre todas as serapilheiras amostradas.

Por último, a UPA MV01, explorada em 2009, se correlacionou positivamente com o teor de Mg (P21) e S (P22), mas negativamente com os teores de fósforo e carbono orgânico da serapilheira (P20). Essa última parcela apresentou os menores teores de P e CO dentre todas as amostras de serapilheira, enquanto as duas primeiras apresentaram valores mais elevados de Mg e S na serapilheira.

Portanto, as áreas apresentam-se ordenadas de maneira distinta em relação aos teores de nutrientes e estoque de serapilheira encontrados em cada parcela amostrada. A serapilheira é a porção mais dinâmica do conjunto serapilheira-solo, sendo variável não só entre ecossistemas, mas também dentro de um mesmo ecossistema (CORREIA; ANDRADE, 2008).

De modo geral, pode-se inferir que as UPAs exploradas anteriormente e a APA (exceto a A1A-P6 e a APA-1) apresentam maior correlação com certos nutrientes e maior particularidade, já que se apresentam menos agrupadas com outras áreas. Já as UPAs mais recentemente exploradas, agrupadas mais no centro do diagrama (exceto DB1-P17 e MV01-P22 e P20), possuem menor correlação com certos nutrientes e maior relação com outras áreas estudadas.

## **5.6 CLASSIFICAÇÃO DAS UPAs E DA APA**

A partir da análise de agrupamentos dos atributos físicos e químicos do solo e da serapilheira (FIGURA 18A) foi possível identificar a formação de grupos com diferentes níveis de similaridade. A correlação cofenética, ou seja, a correlação entre a matriz de similaridade e o dendrograma, de 0,89 indica que houve uma distorção muito pequena entre a matriz original e a matriz calculada para obtenção do dendrograma (FELFILI et al., 2011). Além do mais, esse valor indica que a representação gráfica do dendrograma foi confiável (KOPP et al., 2007).

A análise de agrupamentos isolou a parte sólida do solo: o teor de argila, que representa a fase mineral, e a matéria orgânica, que representa a fase orgânica. Os demais atributos reunidos nos outros grupos são derivados e influenciados por ambos, principalmente pela matéria orgânica. Essa última é um componente complexo e dinâmico que exerce grande influência no comportamento, propriedades e funções do solo no ecossistema (BRADY; WEIL, 2008).

Os teores de P, Mg e Ca da serapilheira apresentaram alta similaridade com  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  do solo, reunidos no mesmo grupo. Da mesma forma, o teor de CO da serapilheira apresentou alta similaridade com os atributos físicos relacionados à compactação do solo (Ds e RP), bem como com a acidez trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) e seu teor de P. Além disso, o estoque de serapilheira se agrupou com a CTC do solo, que corresponde à soma dos cátions trocáveis no solo (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Assim, essas similaridades verificadas entre os teores de nutrientes da serapilheira e do solo corroboram Lugo et al. (1990), que verificou que a quantidade de nutrientes estocada na serapilheira influenciava a quantidade de elementos disponíveis na camada de 0 a 10 cm de profundidade do solo.

Em relação à análise de agrupamentos das parcelas estudadas (FIGURA 18B), sua correlação cofenética de 0,99 indica uma representação gráfica do dendrograma bastante confiável (KOPP et al., 2007), com uma distorção quase nula entre a matriz original e a matriz calculada para obtenção do dendrograma (FELFILI et al., 2011).

Nessa análise, o isolamento da parcela P15 da UPA A1A já era esperado, já que essa parcela apresentou comportamento *outlier* em relação a quase todas as variáveis analisadas neste estudo. Os dois outros grupos corroboram as comparações estatísticas entre as médias dos atributos físicos e químicos do solo e da serapilheira aqui apresentados, em que as UPAs com maior idade pós-exploração normalmente aparecem agrupadas e separadas do outro ou outros grupos formados por UPAs com menor idade pós-exploração.

O fato de as parcelas da APA terem sido agrupadas juntamente com parcelas da UPA explorada em 2009 pode estar relacionado às propriedades físicas do solo de ambas as áreas, com maiores densidades e teores de argila. Por outro lado, a parcela P20 dessa UPA agrupou-se com as parcelas das UPAs anteriormente exploradas, podendo ser explicado, provavelmente, pelos maiores teores de MO e P nela registrados (APÊNDICE B). As parcelas com maior idade pós-exploração foram reunidas em um mesmo grupo por compartilharem as mesmas características quanto às variáveis do solo e da serapilheira analisadas.

Como o sistema de exploração florestal foi o mesmo em todas as UPAs, supõe-se, portanto, que a intensidade da exploração florestal de cada UPA ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) e os respectivos tempos de abandono pós-exploração (idade pós-exploração) tenham evidenciado diferenças entre as áreas exploradas quanto aos atributos do solo e da serapilheira. Porém, como os diferentes grupos formados apresentaram baixa dissimilaridade entre si ( $< 25\%$ ) e em seus solos foram encontrados altos teores de matéria orgânica, os mesmos apresentam alta capacidade de resiliência e parecem se recuperar, ao longo do tempo, de possíveis impactos causados pelas atividades envolvidas na exploração.

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste estudo foram feitas as seguintes conclusões:

- A densidade do solo foi alta, com diferenças significativas entre UPAs e APA;
- A resistência a penetração nas parcelas não diferiu estatisticamente entre UPAs e APA;
- A resistência a penetração nas trilhas de arraste e pátios de estocagem diferiu estatisticamente entre UPAs;
- Os solos das UPAs e da APA apresentaram, em geral, alta acidez e baixa fertilidade natural, sendo classificados como distróficos;
- Os teores de enxofre, cálcio, magnésio e alumínio trocável, além da saturação por bases e saturação por alumínio diferiram estatisticamente entre UPAs e APA;
- Os altos teores de matéria orgânica observados conferiram qualidade física e química aos solos estudados;
- Houve diferença significativa entre UPAs e APA para o estoque de serapilheira;

- Os teores de cálcio, potássio e carbono orgânico da serapilheira diferiram estatisticamente entre UPAs e APA;
- Foi observada similaridade entre nutrientes da serapilheira e do solo, principalmente para cálcio e magnésio;
- A intensidade de exploração juntamente com o tempo pós-exploração de cada UPA evidenciaram baixa dissimilaridade entre UPAs e APA;
- O sistema de exploração florestal da área de estudo, segundo as intensidades de corte das UPAs estudadas, de modo geral, não comprometeu a qualidade do solo nessas UPAs.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados aqui apresentados podem subsidiar futuros estudos visando o monitoramento da qualidade do solo sob a floresta remanescente na área de manejo florestal estudada. Seria fundamental a realização de estudos de levantamento e classificação de solos em UPAs exploradas em anos anteriores a 2003, assim como as UPAs aqui estudadas devem ser monitoradas, periodicamente, em relação ao solo e à serapilheira até completar cada ciclo de corte. Além disso, sugere-se amostragem do solo e da serapilheira em outros fragmentos de APA localizados na área de manejo florestal estudada, sendo possível, assim, realizar uma comparação entre áreas não exploradas e avaliar melhor os atributos do solo e da serapilheira dessas áreas.

Além disso, futuras pesquisas devem ser realizadas com o intuito de uniformizar uma metodologia para este tipo de estudo, facilitando a comparação entre dados provenientes de diferentes áreas de manejo florestal de rendimento sustentado. Dessa forma, será possível fornecer mais subsídios para futuros planos de manejo florestal sustentável no Estado do Amazonas e, possivelmente, em toda a Amazônia quanto à qualidade do solo florestal em áreas florestais manejadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, A. B. Soil compaction on skid trails after selective logging in moist evergreen forest of Ghana. **Agricultural and Biology Journal of North America**, v. 3, n. 6, p. 262-264, 2012.

ALVES, M.C. et al. Propriedades físicas e infiltração de água de um Latossolo Vermelho Amarelo (Oxisol) do noroeste do estado de São Paulo, Brasil, sob três

condições de uso e manejo. **Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe**, Coruña, v. 30, p.167-180, 2005.

AMARAL, P; PINTO, A. Manejo florestal como base para produção e conservação florestal na Amazônia. In: CASES, M. O. (Org.). **Gestão de Unidades de Conservação: compartilhando uma experiência de capacitação**. WWF-Brasil / IPÊ– Instituto de Pesquisas Ecológicas. WWF-Brasil, Brasília, p. 265-278, 2012.

ALFAIA, S.S. Correlação entre a capacidade de troca de cátions e outras propriedades de três solos da Amazônia central. **Acta Amazônica**, v.18, p.3-11, 1988.

ALVAREZ, V.H. et al. Acidez e calagem do solo. In: **Fertilidade e manejo do solo**. Brasília: ABEAS, 1996. 67p. (Módulo, 4).

ARCHIBALD, D.J. et al. **Forest management guidelines for the protection of the physical environment**. Version 1.0, Ministry of Natural Resources, Queen's Printer for Ontario, Toronto. December, 1997. 42 p.

ARNUP, R.W. **The extent, effects and management of forestry-related soil disturbance, with reference to implications for the clay belt: a literature review**. OMNR, Northeast Science & Technology. TR-037. 1998. 30 p.

BARBOSA, M. G. V. et al. Diversidade e similaridade entre habitats com base na fauna de Coleoptera de serapilheira de uma floresta de terra firme na Amazônia Central. **Monografias Tercer Milenio**, SEA, Zaragoza, v. 2, p. 69-83, 2002.

BARLEY, K.P.; GREACEN, E.L. Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth of roots and underground shoots. **Advances in Agronomy**, v.19, p.1-43, 1967.

BARROS, N. F.; COMERFORD, N. B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 2, p. 487-592, 2002.

BAYER, C; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais & Subtropicais**. 2ª ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole. 2008. 654p.

BERNOUX, M. M. Y. **Conteúdo de carbono dos solos da Amazônia Ocidental e mudanças decorrentes da conversão da floresta em pastagens**. (Tese de Doutorado). 98f. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo. Piracicaba. 1998.

BERNOUX, M. et al. Brazil's soils carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.66, p.888-896, 2002.

BIOT, Y. et al. Levantamento de habitats após exploração seletiva de madeira. In: Projeto BIONTE: Biomassa e nutrientes florestais – Relatório final. Manaus, MCT/INPA, p.67-85. 1997.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades do solo**. 7ª edição. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1989. 878p.

BRADY, N. C.; WEIL, R. C. Soil Architecture and Physical Properties. In: BRADY, N. C. WEIL, R. C. (Ed.) **The Nature and Properties of Soils**. 14<sup>th</sup> Edition. Pearson Education, Prentice Hall. 2008. 975 p.

BRASIL. **INSTRUÇÃO NORMATIVA N.º 5**. Brasília: [s.n.], 2006.

BRAZ, E. M. et al. Taxa de corte sustentável para manejo das florestas tropicais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 137-145, 2012

CAMARGO, O. A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargil, 1983. 44p.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Campus Luiz de Queiroz/USP. 1997. 132p.

CARNEIRO, V. M. C. **Composição Florística e Estrutural da Regeneração Natural em uma Floresta Manejada no Município de Silves (AM)**. (2010).174 p. (Doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas na Amazônia – INPA, Manaus, 2010.

CERRI, C. C. et al. Carbon stocks in soils of the Brazilian Amazon. In: LAL, R. et al. **Global climate change and Tropical Ecosystems**. Advances in Soil Science, CRC Press, Boca Raton, p. 33-50. 1999.

CERRI, C. E. P. et al. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. Amsterdam, v. 122, p. 58-72, 2007.

CERRI, C. E. P. et al. Dinâmica da matéria orgânica do solo da Amazônia. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais & Subtropicais**. 2a ed. Rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole. 2008. 654p.

CHANCELLOR, W. J. **Compaction of soil by agricultural equipment**. Berkeley: University of California, Division of Agricultural Sciences, 1977. 53p.

COCHRANE, T.T.; SANCHEZ, P.A. Land resources, soils properties and their management in the Amazon region: A state of knowledge report. In: HECHT, S.B., ed. **Amazon land use research**. Cali, CIAT, p.138-209. 1982.

COELHO, F.S.; VERLENGIA, F. **Fertilidade do solo**. São Paulo: ICEA, 1973. 384p.

CORRÊA, J. C. Características físico-hídricas dos solos latossolo amarelo, podzólico vermelho-amarelo e podzol hidromórfico do Estado do Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 3, p. 347-360. 1984.

CORREIA, M. E. F.; ANDRADE, A. G. Formação de serapilheira e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais & Subtropicais**. 2<sup>a</sup> ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole. 2008. 654p.

COSTA, M.P. **Efeito da matéria orgânica em alguns atributos do solo.** (1983). 137 f. (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ, USP, Piracicaba, 1983.

COLE, D. W.; RAPP, M. Elemental cycling in forested ecosystems. In: Reichle, D. E. (Ed.). **Dynamic properties of forest ecosystems.** Cambridge University Press, Cambridge, England, p.341-409, 1980.

CUEVAS, E.; MEDINA, E. Nutrient dynamics within Amazonian forest ecosystems. In: **Nutrient flux in fine litter fall and efficiency of nutrient utilization.** Decologia, v.68, p.446-472. 1986.

CUEVAS, E. Soil versus biological controls on nutrient cycling in terra firme forests. In: MACCLAIN, M. E. et al. **The biogeochemistry of the Amazon basin.** Oxford University Press. p.53-67. 2001.

CUNHA, G. C. da. et al. Dinâmica nutricional em floresta estacional decidual com ênfase aos minerais provenientes da deposição da serapilheira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.3, n.1, p. 35-64, 1993.

DANTAS, M.; PHILLIPSON, J. Litterfall and litter nutrient content in primary and secondary Amazonian 'terra firme' rain forest. **Journal of Tropical Ecology**, v. 5, n. 1, p. 27-36, 1989.

DE MARIA, I.C. et al. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 23:703- 709, 1999.

DEMATTE, J.L.I. **Manejo de solos ácidos dos trópicos úmidos da região amazônica.** Fundação Cargill, Campinas, 1988. 215 p.

DORAN, J. W. Soil quality and sustainability. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 26. Rio de Janeiro: SBCS, 1997.

EAVIS, B. W. Soil physical conditions affecting seedling root growth: 1- mechanical impedance, aeration, and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. **Plant and Soil**, v.36, p.613-622, 1972.

ELLIOTT, E. T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, n.4, p.627-633, 1986.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo.** 2 ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. Ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2009. 412 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas**. Tradução de NUNES, M. E. T. 2 ed. Londrina: Editora Planta, 2006.

FALESI, I.C. **Ecosistemas de pastagens cultivadas na Amazônia brasileira**. Belém: Embrapa-CPATCU (Boletim Técnico 1). 1976. 193 p.

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

FASSBENDER, H. W. **Modelos edafológicos de sistemas agroflorestais**. 2 ed. Turrialba: Centro Agronomico Tropical de Investigacion y Enseñanza, 1993. 491 p.

FELFILI, J. M. et al. **Análise multivariada em estudos de vegetação**. Brasília: Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal. Comunicações técnicas florestais, v. 9, n. 1, 60 p. 2007.

FELFILI, J. M. et al. Análise Multivariada: princípios e métodos em estudos de vegetação. In: FELFILI, J. M. et al. **Fitossociologia no Brasil: métodos e estudos de casos**. V.1. Editora UFV, MG. p. 122-155. 2011.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo. **Comunicado Técnico Embrapa 69**. EMBRAPA: Corumbá, MS. 2008.

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

FERREIRA, M. M. Caracterização Física do Solo. In: Lier, Q. de J. V. **Física do Solo**. SBCS: Viçosa, MG. 298p. 2010.

FERREIRA, S. J. F. et al. Nutrientes no solo em floresta de terra firme cortada seletivamente na Amazônia central. **Acta Amazônica**, v. 31, n. 3, p. 381-396, 2001.

FERREIRA, S. J. F. et al. Propriedades físicas do solo após extração seletiva de madeira na Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 32, n.3, p. 449-466. 2002.

FERREIRA, S. J. F. et al. Soil water storage in an upland forest after a selective logging in Central Amazonia. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 28, p. 59-66. 2004.

FERREIRA, S. J. F. et al. Nutrientes na solução do solo em floresta de terra firme na Amazônia Central submetida à extração seletiva de madeira. **Acta Amazônica**, n. 36, v.1 p. 59-68. 2006.

FERREIRA, R. L. C. et al. Deposição e acúmulo de matéria seca e nutrientes em serapilheira de um bosque de Sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth.). **Re vista Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.1, p.7-12, 2007.

FIGUEIRA, A. M. S. **Mudanças no uso e cobertura do solo na Amazônia e suas implicações no ciclo de nitrogênio.** (2006). 114 f. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ, USP, Piracicaba, 2006.

FRANKEN, W. et al. **Fluxo de nutrientes através de águas naturais em floresta de terra firme na Amazônia Central.** In: Workshop on Biogeochemistry of Tropical Rain Forest: Problems for Research Proceedings. Piracicaba, São Paulo, p. 29-37. 1985.

FREDERICKSEN, T. S., PARIONA, W. Effect of skidder disturbance on commercial tree regeneration in logging gaps in a Bolivian tropical forest. **Forest Ecology and Management** v. 171, p.223–230. 2002.

GAMA, J. R. N. F. Solos: Manejo e interpretação. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2004, 183p.

GEIST, J. M. et al. Assessing physical conditions of some Pacific Northwest Volcanic ash soils after forest harvest. **Soil Science Society American Journal**, v.53, p.946-50, 1989.

GENRO JUNIOR, S.A. **Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto.** (Tese de Mestrado). 90f. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

GREACEN, E. L . Root response to soil mechanical properties. **Transactions of the 13<sup>th</sup> Congress of the International Society of Soil Science**, v. 5, p. 20-47, 1986.

GREACEN, E.L.; SANDS, R. Compaction of forest soils – a review. **Aust. J. Soil Res.**, v. 18, p. 163-189, 1980.

HALL, J. S. et al. The effects of selective logging on forest structure and tree species composition in a Central African forest: implications for management of conservation areas. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.183, n.1-3, p.249-264, Setembro 2003.

HENDRISON, J. **Damage-controlled logging in tropical rain forests in Suriname.** Wageningen: Agricultural University, 1989. 204 p.

HERRERA, R. et al. Amazon ecosystems: Their structure and functioning with particular emphasis on nutrients. **Interciência**, Caracas, v. 3, p. 223-231, 1978.

HIGMAN, S. et al. **The sustainable forestry handbook.** Earthscan, 1999. 289p.

HIGUCHI, N. Utilização e manejo dos recursos madeireiros das florestas tropicais úmidas. **Acta Amazônica**, v. 24, n. 3-4, p. 275-288, 1994.

HIGUCHI, N. et al. **Crescimento e incremento de uma floresta amazônica de terra firme manejada experimentalmente (Projeto Bionte) Relatório Final.** Manaus: INPA/DIFID. 1997.

HIGUCHI, N. Setor madeireiro e desenvolvimento sustentável na Amazônia. In: VAL, A. L; SANTOS, G. M. dos. **GEEA: Grupo de Estudos Estratégicos Amazônicos**. TOMO III. Manaus, INPA, 2010. 190 p.

HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: UFRGS, 1970. 231 p.

HIRAI, E.H. **Avaliação da Exploração de Impacto Reduzido em Atributos Físicos e Químicos do solo e na regeneração natural em Paragominas, PA**. (2008). 142 f. (Dissertação de Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém – PA, 2008.

IAREMA, A. A. et al. Qualidade física e química do solo em áreas de exploração florestal no Mato Grosso. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.3, Edição Especial, p.737-744, 2011.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Série Manuais Técnicos em Geociências. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro: IBGE, 1992.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2007b. **Censo Agropecuário 2006**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 22/11/2012.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Divulgação da Estimativa da Taxa de Desmatamento por Corte Raso do PRODES 2012**. Brasília: DF. novembro, 2012.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**. New Jersey, Prentice Hall. 1998.

JORGE, J.A. **Física e manejo dos solos tropicais**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 328 p. 1985.

JESUS, C. P. de. **Atributos físicos do solo e produtividade da soja após um ano de integração lavoura-pecuária em área sob plantio direto**. 47 f. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis – SC, 2006,

KELLER, M. et al. Timber production in selectively logged tropical forests in South America. **Front Ecol Environ**, v. 5, n. 4, p. 213-216, 2007.

KENT, M.; COKER, P. **Vegetation description and analysis: a practical approach**. London: Blackwell, 1992. 363p.

KLEIN, V. A. et al. Resistência mecânica do solo a penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 18, n. 2, p. 45-54, 1998.

KLEIN, V. A. et al. Propriedades físico-hídricas de substratos hortícolas comerciais. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 6, p. 218-221, 2000.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo, 2008. 212p.

KOPP, M. M. et al. Melhoria da correlação cofenética pela exclusão de unidades experimentais na construção de dendrogramas. **Uruguiana**, v.14, n.2, p. 46-53. 2007

LAL, R.; BRUCE, J.P. The potential do world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. **Environ. Sci. Pollut.**, v. 2, p. 177-185, 1999.

LONGO, R. M.; ESPINDOLA, C.R. Alterações em características químicas de solos da região amazônica pela introdução de pastagens. **Acta Amazônica**, n. 30, v. 1, p.71-80. 2000.

LOPES, E. S. et al. Avaliação da Umidade na Compactação do Solo Submetido ao Tráfego de Máquinas de Colheita Florestal. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.3, Edição Especial, p.659-667, 2011.

LUGO, A. E. et a. Nutrients and mass in litter and soil of ten tropical tree plantations. **Plant and Soil**, The Hague, v. 125, p. 263-280, 1990.

LUISÃO, F. J. **Produção e decomposição de liteira em floresta de terra firme da Amazônia Central. Aspectos químicos e biológicos da lixiviação e remoção de nutrientes da liteira.** 107 f. Dissertação (Mestrado) - INPA / FUA, Manaus. 1982.

LUIZÃO, F.J. Litter production and mineral element input to the forest floor in a Central Amazonia forest. **Geojournal**, v. 19, p.407-417, 1989.

MACHADO, P. L. O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

MAGALHÃES, S. S. A. et al. Estoque de nutrientes sob diferentes sistemas de uso do solo de Colorado do Oeste-RO. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 1, p. 65-74, 2013.

MARTINS, S. S. et al. Impactos da Exploração Madeireira em Florestas Nativas sobre Alguns Atributos Físicos do Solo. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 22, n. 1, p. 69-76, 1998.

MARTINS, S. S. et al. Efeitos da Exploração Seletiva em uma Floresta Estacional Semidecidual. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.1, p.65-70, 2003.

MARTINS, S. V.; RODRIGUES, R. R. Produção de serapilheira em clareiras de uma floresta estacional semidecidual no município de Campinas, SP. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 22, n. 3, p. 405-412, 1999.

MARTINS, H. et al. **Boletim Transparência Florestal da Amazônia Legal.** Belém: Imazon. p. 12, dezembro, 2012.

MARQUES, J. D. O. Estudo de parâmetros físicos, químicos e hídricos de um latossolo amarelo, na região Amazônica. **Acta Amazônica**, v. 34, n. 2, p. 145-154, 2004.

MATERECHERA, S. A. et al. Penetration of very strong soils by seedling of different plant species. **Plant and Soil**, v. 135, p. 31-41, 1991.

MATOS, F. D. A.; AMARAL, I. L. Análise ecológica em um hectare de floresta ombrófila densa de terra-firme, estrada da várzea, Amazonas, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 29, n. 3, p.365-379, 1999.

MELLO-IVO, W. M. P.; ROSS, S. Efeito da Colheita Seletiva de Madeira sobre Algumas Características Físicas de um Latossolo Amarelo sob Floresta na Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 30, p. 769-776, 2006.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais & Subtropicais**. 2ª ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole. 2008. 654p.

MOREIRA, A; MALAVOLTA, E. Dinâmica da matéria orgânica e da biomassa microbiana em solo submetido a diferentes sistemas de manejo na Amazônia Ocidental. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.39, n.11, p.1103-1110, nov. 2004.

MONTEIRO, A. L. S. et al. Impactos da exploração madeireira e do fogo em florestas de transição da Amazônia Legal. **Scientia Forestalis**, v. 65, p. 11-21, 2004.

NEPSTAD, D. C. et al. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**. V. 398, p. 505-508, 1999.

NEU, V. **Influência da cobertura vegetal na ciclagem de nutrientes via solução do solo na região de Manaus, Amazônia**. 93 f. (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ, USP, Piracicaba – SP, 2005.

NEVES, E. J. M. Deposição de serapilheira e de nutrientes de duas espécies da Amazônia. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.43, p. 47-60, jul./dez. 2001.

OLIVEIRA, A. N. de; AMARAL, I. L. do. Florística e fitossociologia de uma floresta de vertente na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 34, n.1, p. 21-34, 2004.

OLIVEIRA, A.A.; MORI, S. A central Amazonian terra firme forest. I. High tree species richness on poor soils. **Biodiversity and Conservation**, n. 8, p. 1219 – 1244. 1999.

PABIN, J. et al. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. **Soil Till. Res.**, v. 46, p. 203-208, 1998.

PEREIRA JR., R. et al. Forest canopy damage and recovery in reduced-impact and conventional selective logging in eastern Pará, Brazil. **Forest Ecology Management**, v. 168, p. 77-99, 2002.

PEREIRA, W. L. M. et al. Propriedades Químicas de um Latossolo Amarelo Cultivado com Pastagens na Amazônia Oriental. **Scientia Agricola**, v.57, n.3, p.531-537, jul./set. 2000.

PEREIRA, D. et al. **Fatos Florestais da Amazônia**. Belém: Imazon, p. 126, 2010.

PINARD, M. et al. Creating timber harvesting guidelines for a reduced-impact logging project in Malaysia. **Journal of Forestry**, n. 93, p. 41-45, 1995.

PINHO, G. S. C. et al. Análise de custos e rendimentos de diferentes métodos de corte de cipós para produção de madeira na floresta nacional do Tapajós. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 39, n. 3, Sept. 2009.

PINTO, A. C. M. et al. Análise de danos de colheita de madeira em floresta tropical úmida sob regime de manejo florestal sustentado na Amazônia Ocidental. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.26, n.4, p.459-466, 2002.

PINTO, J. R. R. **Levantamento florístico, estrutura da comunidade arbóreo-arbustiva e suas correlações com variáveis ambientais em uma floresta de vale no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães, Mato Grosso.** (Dissertação de Mestrado). 85 f. Universidade Federal de Lavras, Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental. 1997.

PIRES, R. C. M et al. Profundidade do sistema radicular das culturas de feijão e trigo sob pivô central. **Bragantia**, Campinas, v. 50, p. 153-162, 1991.

PITMAN, N.C.A. et al. Tree community change across 700 km of lowland Amazonian Forestry from the Andean Foothills to Brazil. **Biotropica** v. 40, p. 525–535. 2008.

PRECIOUS WOODS AMAZON. **Resumo Público PWA / Mil Madeiras Preciosas.** Silves, AM. Set. 2011. 24 p.

PRITCHETT, W.L. **Properties and management of forest soils.** New York: United States. John Wiley. 1979. 500p.

PROCTOR, J. Tropical forest litterfall. I. Problems of data comparison. In: SUTTON, S. L. et al. (Eds.). **Tropical rain forest: ecology and management.** London: British Ecological Society, p. 267-273, 1983.

RADAMBRASIL – Ministério das Minas e Energia. Dep. Nac. de Prod. Mineral. Folha AS-21 – Santarém. Rio de Janeiro, Projeto RADAMBRASIL, Lev. De Rec. Nat., v.101. 1975. 510p.

RADAMBRASIL. Programa de Integração Nacional. Levantamentos de Recursos Naturais. V.18 (Manaus) – Radam (projeto) DNPM, Ministério das Minas e Energia. Brasil. 1978. 626p.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de Carbono e Nitrogênio e frações orgânicas de latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1609-1623, 2007.

REICHERT, J. M. et al. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: ALVAREZ VENEGAS, V. H. et al. (Ed). **Tópicos em Ciência do Solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 5, p. 50-121.2007.

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Resposta do capim-pensacola à adubação fosfatada e à mineralização em solos com diferentes valores de pH. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 201-205, 1994.

RIBEIRO, I. A. et al. Diagnóstico de uma área compactada por atividade minerária, na floresta amazônica, empregando métodos geoestatísticos à variável resistência mecânica a penetração do solo. **Acta Amazonica**, v. 36, n.1, p. 83-89, 2006.

SALIMON, C. I. et al. Dinâmica do carbono na conversão de floresta para pastagens em argissolos da formação geológica Solimões, no sudoeste da Amazônia. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, ano/vol. 7, n. 001, pp. 29-38. 2007.

SÁNCHEZ, P.A. **Properties and management of soils in the tropics**. New York, Wiley. 1976. 619p.

SANTOS, D. R. et al. Fósforo orgânico do solo. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais & Subtropicais**. 2a ed rev e atual. Porto Alegre: Metrópole. 2008. 654p.

SCHULP, C. et al. Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories. **Forest Ecology and Management**, v. 256, p. 482-490. 2008.

SCOTT, A.J.; KNOTT, M. A cluster analysis methods for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, Raleigh, v. 30, n. 3, p. 507-512, 1974.

SEIXAS, F.; MAGRO, T. C. Indicadores ambientais e paisagísticos relacionados às operações florestais. **Série Técnica IPEF: ESALQ, SP**. v. 12, n. 31, p. 65-78, abr. 1998.

SEIXAS, F.; JUNIOR, E. D. de O. Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira. **Scientia Forestalis**, n. 60, p. 73-87, dez. 2001.

SEIXAS, F. Efeitos Físicos da Colheita Mecanizada de Madeira sobre o Solo. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. (Eds.). **Conservação e Cultivo de Solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. 498 p.

SELVA, E. C. Litterfall production and fluvial export in headwater catchments of the southern Amazon. **Journal of Tropical Ecology**, v. 23, n. 03, p. 329-335, 2007.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 53, p. 591-611. 1965.

SIERRA, C. et al. Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia. **Forest Ecology and Management**, v. 243, p. 299-309, 2007.

SILVA, A. P. **Influência da compactação nas propriedades físicas do solo e no sistema radicular de plântulas de algodão (*Gossypium hirsutum* L.)**. (1984). 92 f. (Dissertação de Mestrado) – Programa de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ, USP, Piracicaba – SP, 1984.

SILVA, M. F. F. da. Produção anual de serapilheira e seu conteúdo mineralógico em mata tropical de terra firme, Tucuruí, PA. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Botanica**. v. 1, p. 111-158, agosto, 1984.

SILVA, J. N. M. **Manejo Florestal**. Embrapa Amazônia Oriental, Belém- PA, 3ª Edição, 2001. 15p.

SILVA, A. P. et al. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society American Journal**, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, S. B. de. **Análise de solos**. Belém: Universidade Federal Rural da Amazônia. Serviço de Documentação e Informação, 2003. 152 p.

SILVA, R. C. et al. Alterações nas propriedades químicas e físicas de um chernossolo com diferentes coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.1, p.101-107, 2007.

SILVA, F. de A. S.; AZEVEDO, C. A. V. de. Principal Components Analysis in the Software Assistat-Statistical Attendance. In: **World Congress on Computers in Agriculture**, 7, Reno-NV-USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.

SILVEIRA, L. H. C. Exportação de nutrientes pela exploração de madeiras comerciais em uma área de floresta amazônica de terra firme em Itacoatiara, AM. (2012). 65f. (Dissertação de Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, 2012.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. **Soil & Tillage Research**. v. 16, p. 179-201. 1990.

SOKAL, R.R.; ROHLF, F.J. The comparison of dendrograms by objective methods. **Taxonomy**, Berlin, v. 11, p. 33-40, 1962.

SOUZA, Z. M. et al. Comportamento de atributos físicos de um Latossolo Amarelo sob agroecossistemas do Amazonas. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.654-662, set./dez. 2004.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. Campinas, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.15, p.229-235, 1991.

STOLF, R. et al. **Recomendação para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar – Stolf**. Revista STAB – açúcar, álcool e subprodutos, v. 1, n. 3, p.18-23, 1983.

STRECK, C. A. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, p. 755-760, 2004.

TEIXEIRA, L. B. et al. Ciclagem de nutrientes através da liteira em floresta, capoeira e consórcios com plantas perenes. **Revista Ciências Agrárias**, Belém, n. 36, p. 9-17, jul./dez. 2001.

TELLES, E. D. C. et al. Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**. v. 17, n.2, 2003.

TOMÉ JÚNIOR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247p.

USDA. Soil Survey Division Staff. **Soil survey manual**. Washington, DC, USA, 1993. 437p. (Handbook, 18).

USDA. Natural Resources Conservation Service. Disponível em: <http://soils.usda.gov/technical/aids/investigations/texture/> Acesso em: 18/11/2012 às 14h30.

USUGA, J. C. L. et al. Estimation of biomass and carbon stocks in plants, soil and forest floor in different tropical forests. **Forest Ecology and Management**, v. 260, p. 1906-1913, 2010.

VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas, Instituto Agrônomo, 2009. 77 p.

VAZ, C. M. P. et al. **Influência da umidade na resistência do solo medida com penetrômetro de impacto**. Comunidade Técnico, v. 51, São Paulo: EMBRAPA Instrumentação Agropecuária, 2002. 5p.

VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.175-180, 1994.

VERÍSSIMO, A. et al. Impactos da atividade madeireira e perspectivas para o manejo sustentável da floresta numa velha fronteira da Amazônia: o caso de Paragominas. In: BARROS, A. C.; VERÍSSIMO, A. (Ed.) **A expansão madeireira na Amazônia: impactos e perspectivas para o desenvolvimento sustentável no Pará**. Belém: Imazon, 2002. 166p.

VIEIRA, G. Dynamics of the remaining plant population in gaps after logging in the Amazon. **Conference on Forestry and Forest Products Research**, p. 54-67, 1995.

VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C. dos. **Amazônia: seus solos e outros recursos naturais**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1987. 416p.

VITOUSEK, P. M.; SANFORD, R. L. Nutrient cycling in most tropical forest. **Annual Review Ecology Science**, Palo Alto, v. 17, p. 137-167, 1986.

WERGER, M. J. A. (Ed.) **Sustainable Management of Tropical Rainforests: the Celos management system.** Tropenbos International, Paramaribo, Suriname. 2011. 282p.

WOODWARD, C.L. Soil compaction and top soil removal during mechanized clearing of tropical forest: effects on soil properties and seedling growth. **Journal of Tropical Forest Science**, p. 45-48. 1995.

ZAR, J. K. **Biostatistical analysis.** New Jersey: Prentice Hall, 1996. 662p.

ZOU, C. et al. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, p. 947-958, 2000.

## APÊNDICE

**Apêndice A.** Valores médios obtidos pela análise granulométrica das amostras compostas de solo coletadas nas UPAs e APA estudadas na Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

UPA	ANO	Profundidade cm	Argila	Areia g kg <sup>-1</sup>	Silte	Textura (USDA, 1993)
A1A	2003	0 - 10	525,0	392,0	83,0	Argilosa
		10 - 30	583,0	350,0	67,0	
		30 - 50	617,0	325,0	58,0	
B1B	2005	0 - 10	742,0	167,0	91,0	Argilosa
		10 - 30	742,0	133,0	125,0	
		30 - 50	800,0	125,0	75,0	
DB1	2007	0 - 10	658,0	200,0	142,0	Argilosa
		10 - 30	683,0	192,0	125,0	
		30 - 50	708,0	183,0	109,0	
MV01	2009	0 - 10	617,0	250,0	133,0	Argilosa
		10 - 30	642,0	250,0	108,0	
		30 - 50	683,0	200,0	117,0	
APA	NE	0 - 10	600,0	300,0	100,0	Argilosa
		10 - 30	608,0	267,0	125,0	
		30 - 50	650,0	250,0	100,0	

NE = Não Explorada.

**Apêndice B.** Valores médios das propriedades químicas das amostras compostas de solo coletadas nas três profundidades nas 15 parcelas da área de manejo florestal da Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM.

UPA	Parcela	Prof.	pH (H <sub>2</sub> O)	C <sup>(1)</sup>	MO <sup>(2)</sup>	P <sup>(3)</sup>	S <sup>(4)</sup>	Ca <sup>(5)</sup>	Mg <sup>(6)</sup>	K <sup>(7)</sup>	Na <sup>(8)</sup>	Al <sup>(9)</sup>	H+Al <sup>(10)</sup>	S B <sup>(11)</sup>	CTC <sup>(12)</sup>	V <sup>(13)</sup>	m <sup>(14)</sup>
		cm		g/kg		mg/dm <sup>3</sup>						cmolc/dm <sup>3</sup>					%
A1A	P 15	0 - 10	3,9	13,4	23	32,5	13,2	0,3	0,1	0,46	0,15	1,6	4	1,01	5,01	20	61,3
		10 -- 30	3,8	13,1	22,5	1,5	11,3	0,3	0,1	0,09	0,02	1,5	3,7	0,51	4,21	12	74,6
		30 - 50	4	11,9	20,5	0,4	14,5	0,3	0,1	0,04	0,01	1,2	3	0,45	3,45	13	72,7
	P 7	0 - 10	3,4	27,5	47,3	1,6	8,9	0,4	0,1	0,04	0,01	2,6	5,8	0,55	6,35	9	82,5
		10 -- 30	3,8	16,8	28,9	0,6	6,3	0,3	0,1	0,04	0,01	1,6	4,6	0,45	5,05	9	78
		30 - 50	4,2	11,5	19,8	0,2	7,9	0,3	0,1	0,03	0,01	1,1	3,4	0,44	3,84	11	71,4
	P 6	0 - 10	3,7	34,2	58,8	2	12,9	0,5	0,1	0,46	0,11	2,2	4,3	1,17	5,47	21	65,3
		10 -- 30	3,8	19,8	34,1	0,4	11,6	0,2	0,1	0,04	0,01	1,6	3,7	0,35	4,05	9	82,1
		30 - 50	4,2	12,4	21,3	0,4	12,9	0,4	0,1	0,04	0,01	1,1	3,4	0,55	3,95	14	66,7
B1B	P 2	0 - 10	3,3	27,3	47	1,7	13,7	0,4	0,1	0,06	0,02	3,4	7,8	0,58	8,38	7	85,4
		10 -- 30	3,6	23	39,6	1	11,8	0,5	0,1	0,04	0,01	2,1	4	0,65	4,65	14	76,4
		30 - 50	3,9	15,5	26,7	0,8	7,3	0,5	0,1	0,04	0,01	1,7	3,4	0,65	4,05	16	72,3
	P 1	0 - 10	3,2	44,7	76,9	1,8	11,6	0,6	0,1	0,1	0,04	2,9	6,7	0,84	7,54	11	77,5
		10 -- 30	3,7	22,2	38,2	1,1	9,7	0,7	0,1	0,04	0,01	2,6	5	0,85	5,85	15	75,4
		30 - 50	4	14,3	24,6	0,6	10,8	0,5	0,1	0,03	0,01	1,6	3,7	0,64	4,34	15	71,4
P 3	0 - 10	3,6	39,6	68,1	1,9	12,6	0,4	0,1	0,33	0,01	2,1	5	0,84	5,84	14	71,4	
	10 -- 30	3,9	24,2	41,6	0,4	8,1	0,6	0,1	0,05	0,01	1,6	4	0,76	4,76	16	67,8	
	30 - 50	4,1	13,8	23,7	0,3	5,5	0,3	0,1	0,08	0,01	1,1	2,5	0,49	2,99	16	69,2	
DB1	P 8	0 - 10	3,4	30,7	52,8	1,2	11,8	0,3	0,1	0,04	0,01	2,4	4,3	0,45	4,75	9	84,2
		10 -- 30	3,8	19,7	33,9	0,8	8,1	0,3	0,1	0,03	0,01	1,8	3,4	0,44	3,84	11	80,4
		30 - 50	4	13,7	23,6	0,4	8,9	0,4	0,1	0,03	0,01	1,2	3,7	0,54	4,24	13	69

## Apêndice B. Continuação

		0 - 10	3,4	33	56,8	1,1	8,1	0,3	0,1	0,13	0,03	2,2	4,3	0,56	4,86	12	79,7
	P 17	10 -- 30	3,8	20,3	34,9	2,5	4,7	0,3	0,1	0,27	0,01	1,4	4,6	0,68	5,28	13	67,3
		30 - 50	4	14,7	25,3	0,3	9,2	0,1	0,1	0,05	0,01	1,4	3,2	0,26	3,46	8	84,3
		0 - 10	3,6	28	48,2	0,4	6,6	0,2	0,1	0,06	0,01	2	3,7	0,37	4,07	9	84,4
	P 19	10 -- 30	3,9	19,9	34,2	0,4	11,8	0,2	0,1	0,04	0,01	1,6	4	0,35	4,35	8	82,1
		30 - 50	3,9	18,3	31,5	1,5	14,2	0,2	0,1	0,29	0,07	1,3	4	0,66	4,66	14	66,3
		0 - 10	3,4	35,6	61,2	0,8	7,9	0,2	0,1	0,09	0,02	2,1	5	0,41	5,41	8	83,7
	P 20	10 -- 30	3,7	24,4	42	0,4	8,9	0,3	0,1	0,05	0,01	1,8	4	0,46	4,46	10	79,6
		30 - 50	3,7	20,2	34,7	0,4	6,3	0,2	0,1	0,04	0,01	1,6	3,2	0,35	3,55	10	82,1
		0 - 10	3,4	26,5	45,6	0,6	9,7	0,2	0,1	0,06	0,01	2,2	5	0,37	5,37	7	85,6
MV01	P 21	10 -- 30	3,8	19,8	34,1	0,2	8,4	0,2	0,1	0,05	0,01	1,5	3	0,36	3,36	11	80,6
		30 - 50	3,9	15,9	27,3	0,4	6	0,3	0,1	0,03	0,01	1,3	2,7	0,44	3,14	14	74,7
		0 - 10	3,9	26,5	45,6	0,4	10,8	0,3	0,1	0,06	0,02	1,8	4,3	0,48	4,78	10	78,9
	P 22	10 -- 30	3,9	18,7	32,2	0,4	6,3	0,3	0,1	0,06	0,01	1,5	3,7	0,47	4,17	11	76,1
		30 - 50	4	15,1	26	0,2	4,4	0,2	0,1	0,04	0,01	1,4	3,4	0,35	3,75	9	80
		0 - 10	3,5	30,3	52,1	0,6	9,5	0,2	0,1	0,06	0,01	2	3,7	0,37	4,07	9	84,4
	P CO1	10 -- 30	4,2	14,8	25,5	0,5	4,7	0,2	0,1	0,06	0,01	1,4	3,4	0,37	3,77	10	79,1
		30 - 50	4	12,7	21,8	0,2	7,9	0,2	0,1	0,02	0,01	1,4	3,4	0,33	3,73	9	80,9
		0 - 10	3,3	27,6	47,5	0,9	9,5	0,2	0,1	0,05	0,01	2,4	4,6	0,36	4,96	7	87
APA	P CO2	10 -- 30	3,6	20,8	35,8	3,5	7,6	0,2	0,1	0,24	0,02	1,7	3,4	0,56	3,96	14	75,2
		30 - 50	3,6	15,3	26,3	10,2	13,4	0,2	0,1	0,39	0,06	1,6	3,7	0,75	4,45	17	68,1
		0 - 10	3,3	28,7	49,4	0,7	7,6	0,2	0,1	0,07	0,01	2,5	5	0,38	5,38	7	86,8
	P CO3	10 -- 30	3,8	19,3	33,2	0,5	6,6	0,2	0,1	0,03	0,01	1,8	3,7	0,34	4,04	8	84,1
		30 - 50	3,9	13,9	23,9	0,5	5	0,2	0,1	0,02	0,01	1,4	4,3	0,33	4,63	7	80,9

(1) Carbono Orgânico; (2) Matéria Orgânica; (3) Fósforo; (4) Enxofre; (5) Cálcio; (6) Magnésio; (7) Potássio; (8) Sódio; (9) Alumínio; (10) Acidez; (11) Soma de Bases; (12) Capacidade de Troca Catiônica; (13) Saturação por Bases; (14) Saturação por Alumínio.

**Apêndice C.** Valores brutos da biomassa e dos nutrientes das amostras de serapilheira coletadas nas 15 parcelas da área de manejo florestal da Mil Madeiras Preciosas, Silves, AM. A, B e C = pontos amostrais na parcela permanente.

UPA	Ano	Parcela	Repetição	Estoque	N	P	K	Ca	Mg	S	CO	
				Mg ha <sup>-1</sup>								g kg <sup>-1</sup>
A1A	2003	P15	A	24,68	7	0,6	3,1	0,8	0,53	1,14	77	
			B	10,62	8,1	0,52	3,6	1,1	0,58	0,6	81	
			C	21,09	25	0,51	5,1	1,1	0,51	1,29	126	
		P7	A	4,87	12,5	0,62	2,6	1,5	0,79	1,32	256	
			B	8,22	12,5	0,48	2,1	1,4	0,89	1,2	274	
			C	6,07	9,8	0,59	1,6	0,9	0,79	1,49	114	
	P6	A	4,88	8,8	0,5	1,6	1,3	0,75	1,13	326		
		B	7,62	6,6	0,59	1,6	2,4	0,83	1,6	53		
		C	2,45	14,7	0,55	2,1	1,3	0,82	1,33	155		
	B1B	2005	P2	A	6,55	13,6	0,67	3,1	2,3	0,91	1,31	121
				B	6,58	11,8	0,5	2,6	2,5	1,07	1,2	176
				C	5,27	11,6	0,52	2,1	1,6	0,8	1,2	178
P1		A	7,3	13	0,58	2,6	2,5	0,86	1,01	255		
		B	5,85	14,5	0,63	2,2	3,8	1,4	1,4	61		
		C	7,6	14,9	0,56	2,1	2,3	0,86	2,33	174		
P3	A	3,89	14,3	0,48	1,6	1,3	0,61	0,79	68			
	B	6,73	7,9	0,54	2,1	1,6	0,95	0,9	89			
	C	6,41	6,1	0,68	2,6	1,9	0,99	1,17	108			
DB1	2007	P8	A	5,31	12,3	0,47	2,1	1,1	0,77	1,05	81	
			B	5,84	15,9	0,53	2,6	1,8	0,86	1,4	147	
			C	4,3	9,6	0,64	2,6	1,7	0,75	1,53	120	

<b>Apêndice C. Continuação</b>												
MV01	2009	P17	A	6,31	16,1	0,53	2,6	2,6	0,9	1,27	54	
			B	2,3	6,6	0,42	3,6	2,4	0,73	1,1	177	
			C	4,51	10	0,56	4,6	3	0,97	1,15	45	
		P19	A	4,25	12,7	0,46	4,1	2	0,8	1,02	63	
			B	4,22	9,4	0,69	5,1	2,2	0,95	1,2	210	
			C	4,27	12,5	0,52	3,6	1,8	0,72	1,11	96	
		P20	A	6,04	11,7	0,51	3,6	1,8	0,79	1,48	86	
			B	4,45	15,4	0,54	3,1	1,8	0,77	1,5	55	
			C	8,41	10,3	0,52	3,6	1,6	0,62	1,3	38	
	P21	A	6,72	14,7	0,51	3,1	1,5	0,69	1,23	106		
		B	4,8	13,4	0,58	3,6	1,8	0,86	1,4	98		
		C	4,21	12,9	0,54	3,6	1,6	0,78	1,2	74		
	P22	A	3,54	9,6	0,5	4,1	1,8	0,82	1,83	54		
		B	4,384	11,6	0,59	3,6	2,5	1,07	1,3	56		
		C	3,07	13,7	0,56	4,1	1,8	0,79	1,09	37		
	APA	NE	PCO1	A	9	11,7	0,54	3,6	1,7	0,8	1,41	134
				B	4,65	10,1	0,62	4,6	1,6	0,88	1	120
				C	4,66	15,4	0,53	3,1	1,9	0,77	0,96	30
PCO2		A	2,84	11,8	0,59	5,6	1,4	0,68	1,19	260		
		B	3,43	11,9	0,63	5,1	1,6	0,84	1,4	137		
		C	3,78	17	0,59	4,6	1,8	1,24	1,08	280		
PCO3		A	2,14	15,3	0,6	3,6	1,3	0,7	1,11	78		
		B	3,63	21,3	0,51	4,1	1,3	0,53	1,1	40		
		C	3,06	13,8	0,63	3,6	1,8	0,87	1,01	154		

NE: Não explorada.