

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FORMAS DE FÓSFORO, SUBSTÂNCIAS HÚMICAS E  
NITROGÊNIO INORGÂNICO EM ÁREAS DA AMAZÔNIA  
OCIDENTAL**

**Ederlon Flávio da Veiga Moline**

Engenheiro Agrônomo

**2016**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FORMAS DE FÓSFORO, SUBSTÂNCIAS HÚMICAS E  
NITROGÊNIO INORGÂNICO EM ÁREAS DA AMAZÔNIA  
OCIDENTAL**

**Ederlon Flávio da Veiga Moline**

**Orientador: Prof. Dr. Edson Luiz Mendes Coutinho**

**Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Pavinato**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo)

**2016**

M722f Moline, Ederlon Flávio da Veiga  
Formas de fósforo, substâncias húmicas e nitrogênio inorgânico em  
áreas da Amazônia Ocidental / Ederlon Flávio da Veiga Moline. – –  
Jaboticabal, 2016  
xi, 69 p. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2016  
Orientador: Edson Luiz Mendes Coutinho  
Coorientador: Paulo Sérgio Pavinato  
Banca examinadora: Takashi Muraoka, Valdeci Orioli Júnior, Mara  
Cristina Pessoa da Cruz, José Eduardo Corá  
Bibliografia

1. Amazônia Ocidental. 2. Fracionamento. 3. Terra Preta de Índio.  
I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.81

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: FORMAS DE FÓSFORO, SUBSTÂNCIAS HÚMICAS E NITROGÊNIO INORGÂNICO EM ÁREAS DA AMAZÔNIA OCIDENTAL

**AUTOR: EDERLON FLÁVIO DA VEIGA MOLINE**

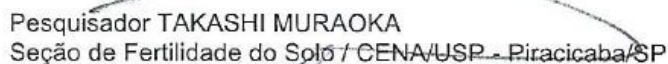
**ORIENTADOR: EDSON LUIZ MENDES COUTINHO**

**COORIENTADOR: PAULO SÉRGIO PAVINATO**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



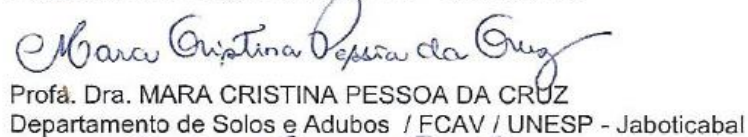
Prof. Dr. EDSON LUIZ MENDES COUTINHO  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal



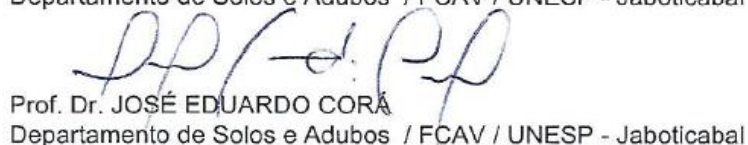
Pesquisador TAKASHI MURAOKA  
Seção de Fertilidade do Solo / CENA/USP - Piracicaba/SP



Prof. Dr. VALDECI ORIOLI JÚNIOR  
Departamento de Agronomia / IFTM - Uberaba/MG



Prof.ª Dra. MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Prof. Dr. JOSÉ EDUARDO CORÁ  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 29 de fevereiro de 2016

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**EDERLON FLÁVIO DA VEIGA MOLINE** – nascido em 1º de setembro de 1986 em Ji-Paraná – RO, graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal de Rondônia (2009). Foi bolsista de iniciação científica durante o período de 2007 a 2009 com apoio CAPES/CNPq. Recebeu título de Mestre em Agricultura no Trópico Úmido pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (2012). Atualmente é aluno do curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) com bolsa do programa RH-Doutorado da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas. Fez Doutorado Sanduíche na Universidade da Flórida com apoio da CAPES pelo Programa Institucional de Doutorado Sanduíche no Exterior.

“Como as folhas, como o vento  
até onde vai dar o firmamento  
toda hora enquanto é tempo  
vivo aqui neste momento  
hoje aqui amanhã não se sabe  
vivo agora antes que o dia acabe  
neste instante nunca é tarde  
mal começou e eu já estou  
com saudade...  
...Como as ondas com a maré  
até onde não vai dar mais pé  
este instante tal qual é  
vivo aqui e seja o que Deus quiser  
hoje aqui não importa pra onde vamos  
vivo agora, não tenho outros planos  
é tão fácil viver sonhando  
enquanto isso a vida vai passando...”

Sérgio Britto

## **DEDICATÓRIA**

Dedico à minha amada mãe Maria Regina da Veiga por todo esforço, luta e força durante todos esses anos de estudo. Minha vitória, sua vitória.

Dedico também à Eliza Barboza, namorada e companheira de toda essa jornada. Sua força, apoio e dedicação foram fundamentais para alcançar mais essa importante etapa da minha vida, obrigado por se fazer presente.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela força, fé e amparo por mais essa vitória na minha vida profissional.

À minha mãe, que tanto me apoia e sofre com a minha ausência.

À Eliza Barboza por toda a vivência, força e companheirismo.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” pela oportunidade.

Ao Prof. Edson Luiz Mendes Coutinho pela orientação, paciência e disposição para o desenvolvimento e conclusão desse trabalho.

Ao Prof. Paulo Sérgio Pavinato pelo apoio no desenvolvimento das análises na ESALQ/USP.

Aos professores da UNESP que fizeram parte do meu enriquecimento intelectual, em especial a Profa. Carolina Fernandes.

Aos amigos de Jaboticabal, Iolanda Reis, Saulo Cardoso, Jordana Flores, Ivanildo Amorim, Ludmila Freitas, Bernardo Nogueira, Tatiana Pagan, Fernando Chimolera e Fábio Lucas pelo apoio e companheirismo.

A amiga Elaine Farias e ao primo Tayson pela amizade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM, Programa RH-Doutorado pela concessão da bolsa de estudos.

À CAPES pela bolsa de estudos durante o Doutorado Sanduíche.

Aos professores e funcionários da Universidade da Flórida/NFREC - Quincy pela oportunidade e todo o aprendizado.

À Doutora Cheryl Mackowiak, Jennifer Shirley, Sussanah Wright, Juliet Wright, Chris Bliss, Sanju, Kunwar, Lydia Bolton, Hiran, Tony, Teddy Stansly, Katie Stevens, Irving Chan, Rose Aguiar, Katerina Camacho, Maria Isidória, Genna Gonzaga, Alessandra Reis e Trina Jones pela vivência, oportunidade, sabedoria e todos os bons momentos que tivemos durante a minha estadia no Estados Unidos.

E às demais pessoas que participaram direta e indiretamente da minha vida acadêmica e que me ajudaram que esse sonho/etapa fosse concluído.

## SUMÁRIO

|                                                                                                                           | Página    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>RESUMO .....</b>                                                                                                       | <b>x</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                                                                     | <b>xi</b> |
| <b>CAPÍTULO 1 – Considerações gerais</b>                                                                                  |           |
| 1.1 INTRODUÇÃO .....                                                                                                      | 01        |
| 1.2 REVISÃO DE LITERATURA .....                                                                                           | 03        |
| 1.2.1 Considerações de áreas e solos da Amazônia .....                                                                    | 03        |
| 1.2.2 Fósforo em solos tropicais .....                                                                                    | 08        |
| 1.2.3 Fracionamento do fósforo .....                                                                                      | 10        |
| 1.2.4 Substâncias húmicas em solos tropicais .....                                                                        | 11        |
| 1.2.5 Fracionamento de substâncias húmicas .....                                                                          | 14        |
| 1.2.6 Formas inorgânicas de nitrogênio em solos tropicais .....                                                           | 16        |
| 1.3 REFERÊNCIAS .....                                                                                                     | 19        |
| <b>CAPÍTULO 2 – FORMAS DE P EM ÁREAS DA AMAZÔNIA OCIDENTAL</b>                                                            |           |
| RESUMO .....                                                                                                              | 29        |
| 2.1 INTRODUÇÃO .....                                                                                                      | 30        |
| 2.2 MATERIAL E MÉTODOS .....                                                                                              | 31        |
| 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                                                          | 36        |
| 2.3.1 Frações orgânica e inorgânica .....                                                                                 | 37        |
| 2.3.2 Labilidade das formas de P .....                                                                                    | 39        |
| 2.3.2.1 Formas de P lábil .....                                                                                           | 40        |
| 2.3.2.2 Formas de P moderadamente lábil .....                                                                             | 42        |
| 2.3.2.3 Formas de P não-lábil e P total .....                                                                             | 44        |
| 2.4 CONCLUSÕES .....                                                                                                      | 46        |
| 2.5 REFERÊNCIAS .....                                                                                                     | 46        |
| <b>CAPÍTULO 3 – FRACIONAMENTO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS E FORMAS DE NITROGÊNIO INORGÂNICO EM ÁREAS DA AMAZÔNIA OCIDENTAL</b> |           |
| RESUMO .....                                                                                                              | 51        |
| 3.1 INTRODUÇÃO .....                                                                                                      | 52        |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 3.2 MATERIAL E MÉTODOS ..... | 53 |
| 3.3 RESULTADOS .....         | 57 |
| 3.4 DISCUSSÃO .....          | 62 |
| 3.5 CONCLUSÃO .....          | 66 |
| 3.6 REFERÊNCIAS .....        | 66 |

## FORMAS DE FÓSFORO, SUBSTÂNCIAS HÚMICAS E NITROGÊNIO INORGÂNICO EM ÁREAS DA AMAZÔNIA OCIDENTAL

**RESUMO** – A abertura de áreas agrícolas na Amazônia altera a dinâmica do ambiente e consequentemente os atributos químicos do solo. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar o efeito da transformação de áreas de florestas em áreas de cultivo agrícola quantificando as formas de P, substâncias húmicas e N inorgânico na Amazônia Ocidental. Foram coletadas amostras de solos em Latossolo Amarelo sob mata nativa, pastagem, citrus, e em áreas com horizonte A antrópico, citrus em Terra Preta de Índio e citrus em Terra Mulata nas profundidades de 0 – 5, 5 – 10 e 10 – 20 cm no município de Manacapuru, Amazonas e realizado o fracionamento de P, substâncias húmicas e N inorgânico. A área de mata nativa apresentou os menores teores de formas de P quando comparado aos demais ambientes que aumentaram seus teores após a derrubada da floresta. A área de Terra Preta de Índio foi a área que apresentou as maiores médias em todas as formas de P diferenciando dos demais solos. Entre as formas de P, a fração não-lábil foi a mais presente em todas as áreas e a P lábil, a menor, concentradas na camada de 0 – 5 cm. As substâncias húmicas foram predominantes nas áreas em forma de humina na camada superficial, seguido de ácido húmico e ácido fúlvico. A relação AH/AF foi considerada adequada nas áreas de mata nativa e cultivo de citrus. A presença de N na forma inorgânica de  $\text{N-NH}_4^+$  e  $\text{N-NO}_3^-$  corresponderam a pequena parte do N total do solo sendo a primeira forma predominante em todas as áreas, e em Terra Preta de Índio os valores foram equilibrados proporcionalmente. A área de Terra Preta de Índio apresentou menor efeito negativo na transformação da área de floresta e uso em cultivo agrícola quando comparado a Terra Mulata, cultivo de citrus, pastagem e mata nativa, verificando nessa última área a melhor estabilidade dos atributos avaliados e melhor qualidade do solo.

**Palavras-chave:** Fracionamento, Terra Mulata, Terra Preta de Índio

## PHOSPHORUS FRACTIONS, HUMIC SUBSTANCES AND INORGANIC NITROGEN IN AREA OF WESTERN AMAZON

**ABSTRACT** – The transformation of agricultural areas in the Amazon changes the dynamics of the environment and consequently the soil chemical properties. The purpose of this study was to evaluate the effect of conversion of forest areas into areas of agriculture quantifying P fractions, humic substances and inorganic N in the Western Amazon. Soil samples were collected in Oxisol under native forest, pasture, citrus, and in areas with anthropogenic A horizon, citrus in Terra Preta de Índio and citrus in Terra Mulata in the depths 0-5, 5-10 and 10-20 cm in the city of Manacapuru, Amazonas and held phosphorus fractionation, humic substances and inorganic nitrogen. The native forest area had the lowest concentrations of P fractions when compared to other environments that increased their levels after forest clearing. The area of Terra Preta de Índio was the area that received the highest average in all P pools differing from other soils. Among the P pools, the non-labile fraction was the most widespread in all areas and P labile concentrated in the lower layer of 0-5 cm. The humic substances were prevalent in areas from the surface layer humin, humic acid and followed by fulvic acid. The ratio HA/AF was considered appropriate in the areas of native forest and citrus cultivation. The presence of inorganic N as  $\text{N-NH}_4^+$  and  $\text{N-NO}_3^-$  corresponding to small part of the total N soil predominant form being the first in all areas, and Terra Preta de Índio values were similar. The area of Terra Preta de Índio showed less negative effect on the transformation of forest area and use in agricultural cultivation compared to Terra Mulata, citrus cultivation, pasture and native forest, checking in this last area the better stability of the evaluated attributes and best quality from soil.

**Keywords:** Fractionation, Terra Mulata, Terra Preta de Índio

## **CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS**

### **1.1. INTRODUÇÃO**

A abertura e transformação de áreas de floresta em cultivos agrícolas na Amazônia vem aumentando consideravelmente desde a década de 60 com a extração da madeira e queima da área total. Com isso, há o rompimento da ciclagem de nutrientes e consequentemente perdas consideráveis nos teores de matéria orgânica do solo, alterando negativamente a já baixa fertilidade natural dos Latossolos da região (BRINKMANN; NASCIMENTO, 1973; SANCHEZ et al., 1982; FALLEIRO et al., 2003).

A Terra Preta de Índio (TPI) difere quimicamente das demais áreas de solos da Amazônia por sua alta fertilidade. A presença de biocarvão originado de habitação indígena antepassada, aumentou a CTC do solo e a retenção de nutrientes, diminuindo perdas por lixiviação e aumentando a fertilidade dessas áreas (SOMBROEK, 1966; GLASER et al., 2001). Adjacente às áreas de TPI, a Terra Mulata (TM) destaca-se por apresentar menor fertilidade do que a TPI, porém com maior fertilidade quando comparada aos demais Latossolos da Amazônia. A TPI e a TM possuem pH em torno de 5,2 a 6,4, elevado teor de matéria orgânica, altos teores de Ca, Zn, Mn e, principalmente, altos teores de P (FALCÃO; BORGES, 2006).

O P é considerado um dos nutrientes mais limitantes em solos tropicais por sua capacidade de adsorção e precipitação em condições de solos intemperizados. Fatores como altos teores de minerais 1:1, óxidos e hidróxidos de Fe e Al, baixo pH, entre outros, limitam a quantidade de P em forma assimilável pelas plantas. O P pode ser encontrado em formas orgânicas e inorgânicas, sendo as formas orgânicas de extrema importância no P disponível em solos tropicais (NOVAIS; SMYTH, 1999; SANTOS et al., 2008).

O grau de estabilidade química do P no solo o divide-se em: P lábil, definido pelo fosfato em equilíbrio com a solução do solo e a fase mineral do solo; P moderadamente lábil, considerado o fosfato retido com energia de menor força e capaz de suprir a solução do solo em escala de tempo maior que o P lábil; e P não-lábil que condiz ao fosfato retido fortemente a ponto de não ser disponível na solução do solo (PAVINATO; DAO; ROSOLEM, 2010).

As alterações de áreas de floresta para áreas de cultivo modificam a matéria orgânica do solo e consequentemente as formas de P e sua labilidade. A extração sequencial de P no solo quantifica a disponibilidade de curto a longo prazo do P em forma assimilável pelas plantas.

Assim como ocorre com as formas de P, a decomposição da matéria orgânica e subprodutos da mineralização sofrem mudanças em sua formas e teores em áreas de floresta em transição agrícola. As substâncias húmicas (SH) são a parte final da decomposição da matéria orgânica e representam 2/3 do teor de carbono orgânico total no solo e podem ser divididas em três frações: ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e humina (HU) (STEVENSON, 1994).

As frações das SH se diferenciam no grau de solubilidade em meio aquoso e estão relacionadas a fertilidade do solo e qualidade do solo, relacionando assim ao estudo dos impactos na mudança de ambiente e sustentabilidade de cultivos agrícolas.

O nitrogênio (N) é encontrado em solos tropicais em grande parte na matéria orgânica do solo, ao qual após a mineralização há a disponibilidade em forma inorgânica para a absorção das plantas. Do N total no solo, cerca de 98% está concentrado na forma orgânica (ALFAIA, 2006), e a outra pequena parte está em forma de  $\text{N-NH}_4^+$  e  $\text{N-NO}_3^-$  passíveis de interações de perda, interações com a mineralogia do solo e queda em seus teores pelo uso, manejo e modificação nas áreas de cultivo, podendo ser um parâmetro comparativo entre sistemas pela sua dinamicidade (GIANELLO et al., 2000).

Assim, o objetivo principal dessa pesquisa foi avaliar as consequências da transformação de áreas de florestas em áreas de cultivo agrícola em Latossolo Amarelo da Amazônia Ocidental sob mata nativa, pastagem, citrus, e em áreas com horizonte A antrópico (Terra Preta de Índio e Terra Mulata também cultivadas com citrus) quantificando as formas de P, as substâncias húmicas e o N inorgânico.

## **1.2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **1.2.1 Considerações gerais sobre áreas e solos da Amazônia**

O bioma Amazônia corresponde a cerca de 60% do território brasileiro, equivalente a 5,5 milhões de km<sup>2</sup> (FERREIRA; VENTICINQUE; ALMEIDA, 2005). Compreende os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Rondônia, Roraima, Pará e Tocantins, sendo a região de menor densidade populacional do Brasil (IBGE, 2015).

Até a década de 60, a Amazônia era um território pouco explorado, fato que mudou na década de 70 por incentivo do Governo Federal, por meio de programas de povoamento e construção de estradas que iriam ligar a Amazônia ao restante do Brasil. O modelo de colonização proposta era a derrubada integral da mata nativa com a finalidade de uso para agricultura, fato que aumentou consideravelmente o desmatamento na Amazônia legal (McGRATH; DURYEY; CROPPER, 2001; FERREIRA; VENTICINQUE; ALMEIDA, 2005).

Atualmente as leis de desmatamento e uso da área de floresta amazônica são diferentes, rígidas e com foco de preservação ambiental, fato que não diminui a pressão de abertura e expansão da fronteira agrícola e pecuária situada principalmente nas bordas sul e leste da Amazônia brasileira (LUI; MOLINA, 2009). Até o ano de 2014 foram derrubados cerca de 15% (407.765 km<sup>2</sup>) da área de floresta (INPE, 2015), com tendência de aumento a cada ano, sendo os estados do Mato Grosso, Pará e Rondônia os mais desmatados na Amazônia brasileira (IBGE, 2015).

A abertura de novas áreas na Amazônia, em grande parte, é feita de modo itinerante, com a exploração de árvores com fins comerciais seguida da queima do restante da vegetação (MARTINS et al., 1991). Após esses processos, o plantio de culturas como arroz, milho, feijão, banana e mandioca é estabelecido nas áreas recém abertas, geralmente por pequenos produtores que não utilizam insumos agrícolas para produção, como calcário e adubos (SERRÃO, 1995). Assim, essas áreas são produtivas por cerca de dois anos e decaem consideravelmente por causa da diminuição da fertilidade do solo, surgimento de plantas espontâneas, pragas e doenças (ARAÚJO et al., 2004), o que culmina no abandono da área e abertura de um novo campo agrícola em avanço à floresta nativa.

A criação de gado e as áreas de pastagem tem grande participação territorial na abertura de novas áreas para o uso agrícola na Amazônia. Araújo et al. (2011) estimaram que 80% do que é desmatado na floresta amazônica é destinado para a pecuária, e que metade dessa área estabelecida está em processo severo de degradação. O pouco uso de tecnologia e técnicas agrícolas, associadas a práticas rudimentares como a queima da pastagem para “renovação”, são fatores agravantes no processo de abandono das áreas por queda no rendimento (FEARNSIDE, 2005). Também no cultivo agrícola, a produtividade da biomassa tende a decair com o passar de poucos anos por exaustão dos nutrientes contidos nas cinzas e restos de floresta como fonte de nutrientes para a pastagem (DIEZ et al., 2007; LOSS et al., 2014).

A grande parte dos solos da Amazônia, cerca de 75%, são classificados como Latossolos e Argissolos, os quais são altamente intemperizados, profundos, com altos teores de Al trocável, baixa saturação por bases, elevada acidez e baixa fertilidade, mesmo nas áreas de floresta (SANCHEZ et al., 1982). Na composição mineral desses solos, a caulinita é predominante, mineral de argila de baixa reatividade, e ocorrem altos teores de óxidos de Fe (hematita e goethita) e Al (gibsitita) (COSTA et al., 1999).

Mesmo os solos da Amazônia apresentando fertilidade do solo limitante para as plantas, a capacidade de manutenção da floresta é originada da ciclagem de nutrientes com a decomposição de material orgânico depositado no solo, que atua nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (CERRI; VOLKOFF; ANDREAUX, 1991). Esse sistema é considerado quase fechado, devido à pequena perda por lixiviação e escoamento superficial, e é capaz de suprir as necessidades nutricionais da floresta em solos considerados de baixa fertilidade (LONGO; ESPÍNDOLA, 2000).

Entretanto, com a retirada da floresta e o rompimento da ciclagem de nutrientes, as áreas se degradam rapidamente perdendo a capacidade de manter plantas devido à baixa taxa de reposição da matéria orgânica, comprometendo o fornecimento de nutrientes para as plantas em subsequência (LIMA et al., 2011). Associado a condições regionais que aceleram a decomposição da matéria orgânica, como umidade e altas temperaturas, e a diversidade biológica, com destaque para a microbiana, a mineralização do material orgânico é realizada rapidamente (FERREIRA et al., 2012), ocorrendo diminuição considerável da matéria orgânica e interferindo no processo de disponibilidade de nutrientes para as plantas. Sanchez et

al. (1982) atribuem a fertilidade dos solos na Amazônia a mineralização da matéria orgânica, que fornece os nutrientes às plantas, sendo a outra maior parte dos nutrientes não absorvida e principalmente fixada por argilas 1:1, caulinita e gibsita, se tornando indisponível a solução do solo.

A fertilidade do solo em ambiente natural na Amazônia apresenta material de origem pobre em nutrientes, resultando em baixos teores de cátions básicos, pH baixo do solo e altos teores de Al (CRAVO; SMYTH; BRASIL, 2012). Smyth (1996) cita o pH dos solos da Amazônia inferiores a 4,5; Moreira e Malavolta (2002) descreveram que somente 0,62% dos solos amazonenses tem saturação por bases maior que 40%, porém os valores da saturação por Al estão acima de 50% em 77% dos solos de floresta da região.

Aliada a baixa fertilidade natural, a precipitação pluvial alta e a textura arenosa de alguns solos contribuem para perdas por lixiviação dos nutrientes (LEHMANN et al., 2003; LONGO; ESPÍNDOLA, 2000; CAMPOS et al., 2012). O K não ocorre naturalmente em teores nos solos da Amazônia, sendo a matéria orgânica do solo uma das principais fontes nessas áreas. Devido à alta pluviosidade, o K pode sofrer perdas pela mobilidade via solução do solo (GRIMALDI et al., 2004). Ferreira et al. (2006) estimam que parte do Ca e Mg estocados na biomassa do material orgânico é perdida por lixiviação sob condições de altas temperaturas e chuvas intensas.

A disponibilidade de micronutrientes em solos da Amazônia é considerada baixa, principalmente por causa do material de origem, textura e potencial redox, sendo os elementos Cu, Fe, Mn, Ni e Zn considerados dentro do adequado em grande parte das áreas agrícolas (LIMA et al., 2006).

Considerando a baixa fertilidade natural dos solos da Amazônia e a dependência desse sistema pela ciclagem de nutrientes da matéria orgânica para sua manutenção, o processo de abertura de novas áreas de floresta altera consideravelmente os atributos químicos do solo (BRINKMANN; NASCIMENTO, 1973). Sanchez et al. (1982) citam o agravamento na disponibilidade de nutrientes para o cultivo subsequente em solo da Amazônia após a conversão de áreas de mata nativa para áreas agrícolas. Houve aumento da acidez e da saturação por Al e redução nos teores de Ca e Mg nos dois primeiros anos de cultivo. Kauffman et al. (1994) considerou a queima como o principal meio de perda de matéria orgânica e por

volatilização do N (50 a 90%) da biomassa para a atmosfera em forma de N<sub>2</sub>, indicando um fator a mais de redução e possibilidade de insucesso de cultivo em áreas recém abertas e mal manejadas.

Áreas distintas na Amazônia, porém, podem manter alta fertilidade mesmo após a derrubada, queima e uso para a agricultura (SILVA et al., 2012). A Terra Preta de Índio (TPI) ou Terra Preta Antropogênica (TPA) são áreas de coloração enegrecida intensa e com propriedades químicas e físicas distintas quando comparada aos demais solos da Amazônia (SOMBROEK, 1966). Nessas áreas é possível encontrar restos de artefatos cerâmicos, evidenciando a presença humana há cerca de 1000 a 2000 anos na Amazônia (GLASER et al., 2001) que atualmente é fundamentada em evidências arqueológicas e pedológicas.

O tamanho da área de TPI é compatível com a população que habitava nesses locais. Em geral configura área circular de 2 a 5 hectares, próxima a rios, que eram o meio de locomoção (KERN et al., 2003). Essas áreas, em grande parte, são classificadas como Latossolo e Argissolo com horizonte A antrópico, possuindo de 10 - 200 cm de profundidade, antropizados em camadas que eram cobertas sequencialmente por deposição de material orgânico (SILVA et al., 2012). Segundo Smith (1980) cada 1 cm de TPI é equivalente a 10 anos de ocupação humana.

Os assentamentos indígenas possuem coloração enegrecida pelo material orgânico abundante nessas áreas, o biocarvão. A origem desse material veio de fogueiras para preparo de alimentos e pela eliminação do lixo produzido pela aldeia com o uso do fogo. Assim, de forma não intencional, foi adicionado ao solo um material de alta CTC, de alta estabilidade e resiliente, capaz de resistir aos fatores climáticos que favoreceriam a decomposição do material, como altas temperaturas e umidade elevada (KERN; COSTA, 1997).

Ao redor das áreas de TPI, há áreas de coloração menos enegrecida e com menor quantidade de artefatos cerâmicos. A Terra Mulata (TM) como é chamada, indica ter sido o local que os indígenas utilizavam para a agricultura, por isso é encontrada em maiores extensões e com menos vestígios de habitação humana (SOMBROEK, 1996; GLASER et al., 2001). Neves et al. (2003) descrevem práticas intencionais de manejo nessas áreas, como a adubação verde, compostagem e aplicação de materiais que viriam a contribuir para a fertilidade da área. Como essas

áreas eram rapidamente cobertas por plantas invasoras, os indígenas priorizavam a abertura de novas áreas ou o uso do fogo para limpeza da área, originando também o biocarvão, porém em menor quantidade quando comparada a TPI.

O biocarvão presente na TM tem origem basicamente de árvores, e a profundidade antropizada geralmente se limita aos 20 cm iniciais do perfil do solo. A TPI e a TM possuem a mesma mineralogia da argila, textura e estrutura dos solos adjacentes, diferindo pela cor, presença de cerâmicas e principalmente pela fertilidade (NOVOTNY et al., 2009).

De forma generalizada, a origem do biocarvão provém de resíduos de peixes, carapaças de tartarugas, caça animal, biomassa vegetal, sementes, conchas e dejetos humanos, entre outros materiais (LIMA et al., 2002; LEHMANN et al., 2003), que conferem considerável CTC aos solos nessas áreas. O processo pirogenético ao qual foi submetido o biocarvão teve parte do material orgânico queimado em ausência de O<sub>2</sub>, com um total de 80 – 90% de poros vazios devido à volatilização dos compostos e água, do que resulta o material de baixa densidade (0,3 – 0,4 kg dm<sup>-3</sup>) e estrutura policíclica aromática com elevado grau de condensação (NOVOTNY et al., 2009). Com isso, o biocarvão é capaz de reter nutrientes da decomposição de material orgânico, não perdendo para o meio, por lixiviação (ARCHANJO et al., 2014).

O acúmulo de nutrientes proporcionado pelo biocarvão em áreas de TPI foi o bastante para diferenciá-la quimicamente das demais áreas da Amazônia, mesmo em condições que favorecem a degradação do material orgânico e a diminuição da fertilidade do solo (ARCHANJO et al., 2014).

As áreas de TPI e TM são caracterizadas quimicamente pelos altos teores de carbono orgânico, P disponível, Ca, Mg, Mn e Zn, além de pH em água em torno de 6,0 (GLASER et al., 2001; FALCÃO; BORGES, 2006). Essas áreas apresentam alta CTC, baixa acidez potencial, baixa ou nula saturação por Al e alta saturação por bases, quando se compara aos solos adjacentes. Porém, a fertilidade da TPI é maior do que a da TM, e a TM possui maior fertilidade quando comparada aos demais solos adjacentes (HECTH, 2003).

Em consequência da fertilidade dessas áreas e da capacidade produtiva, as áreas de TPI e TM estão sendo preferidas para o cultivo por agricultores da região, que após a identificação da área fazem a abertura e limpeza, e posteriormente o

cultivo agrícola. O modelo de agricultura familiar é o predominante na região, com cultivo intensivo em baixa escala de hortaliças, frutíferas e pequenas plantações em áreas de TPI e TM, sem o uso de fertilizantes comerciais e outros insumos agrícolas (LIMA et al., 2002). Esse modelo de agricultura vem mantendo áreas produtivas durante anos, porém German (2003) observou que a alta produtividade agrícola constante em área de TPI e TM podem exaurir a fertilidade do solo necessitando reposição de nutrientes ou aumento dos teores de resíduos orgânicos incorporados ao solo para manutenção do sistema produtivo.

### **1.2.2 Fósforo em solos tropicais**

A abertura e transformação das áreas de floresta em cultivos agrícolas modifica a dinâmica do ambiente, altera a ciclagem de nutrientes e a disponibilidade de nutrientes para as plantas (FERREIRA et al., 2006; TIECHER et al., 2012). O P é um dos nutrientes mais afetados pela transformação de áreas (McDOWELL; STEWART, 2006), pois em condições de solos tropicais e intemperizados não adubados, como os do Brasil, a mineralização da matéria orgânica é a principal responsável no fornecimento de P às plantas, podendo corresponder a até 80% do P disponível (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2002; CONDRON; TIESSEN, 2005).

Após o N, o P é considerado o segundo fator nutricional mais limitante em solos tropicais (SANTOS et al., 2002; MACHADO et al., 2011), e participa de atividades fisiológicas no crescimento e desenvolvimento das plantas, podendo ser insuficiente para adequada produtividade e rendimento das culturas agrícolas (SILVA et al., 2006).

A quantidade de P disponível no solo para utilização imediata das plantas é considerada baixa por causa da grande reatividade e da alta taxa de retenção de P na fase sólida do solo (STUTTER et al., 2015). A classe de solo Latossolo representa grande parte da área agrícola brasileira, e apresenta baixos teores de P na solução do solo (P disponível), pois a fração argila é constituída predominante por minerais 1:1, óxidos e hidróxidos de Fe e Al, o pH do solo é baixo, e esses são os fatores que mais favorecem a adsorção de P (SANCHEZ et al., 1982).

A capacidade de reação do P é dependente do grau de energia ao qual está ligado o ânion. Compostos de alta energia entre o P e os coloides do solo são a forma de P mais comumente encontrada nos solos brasileiros e os principais componentes

do P total, restando assim pequena parte em baixa energia de ligação e que se tornará disponível para a absorção de plantas (ARAÚJO; SALCEDO, 1997; BEZERRA et al., 2015).

Além de ocorrer na forma inorgânica, no solo têm-se o P orgânico. Na forma orgânica o P faz parte dos resíduos vegetais, como fosfatos de inositol (10 a 80% do P orgânico total), fosfolipídios (0,5 a 7%), ácidos nucleicos (aproximadamente 3%) e outros ésteres fosfato (cerca de 5%), e também do tecido microbiano e produtos de sua decomposição, que em todos os casos, necessitam da mineralização para estarem disponíveis para as plantas (DALAL, 1977; GIAVENO et al., 2010).

O P inorgânico está presente na estrutura de minerais, adsorvido a óxidos de Fe e Al da fração argila, precipitado com Fe, Al e Ca, e presente na solução do solo em forma de P disponível. A forma de P na solução do solo é considerado o P adsorvido em fraca ligação na superfície dos coloides, produto da decomposição da matéria orgânica ou mesmo de origem da liberação de minerais primários (CESSA et al., 2009).

A forma de P inorgânico é variável de acordo com o pH do solo, sendo a forma dihidrogenofosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) predominante entre o pH 2,1 e 7,2, e o hidrogenofosfato ( $\text{HPO}_4^-$ ) entre o pH de 7,2 e 12, representando essas duas formas de P inorgânico mais importantes para a absorção das plantas. O pH ideal do solo para a maior disponibilidade de P inorgânico na solução do solo está na faixa de 5 a 6, porém nesse mesmo pH é possível haver precipitação de formas iônicas com Fe e Al com P. Precipitados semelhantes são formados com formas iônicas de Ca em pH acima de 7, tendo essa última forma, reversibilidade com a acidificação do solo (HAVLIN et al., 2005).

De certa maneira, o grau de estabilidade química e a forma como a solução do solo é abastecida em P, determina a classificação do fosfato em lábil, moderadamente lábil ou não-lábil (CROSS e SCHLESINGER, 1995).

A fração lábil pode ser definida como fosfatos que estão em equilíbrio entre a fase mineral e a solução de solo, que podem retornar rapidamente à solução do solo; na moderadamente lábil os fosfatos estão retidos com energia de ligação capaz de aumentar o tempo para liberação; e o fosfato não-lábil é o que não está prontamente disponível para ser disponível a solução do solo (GATIBONI et al., 2013). Todo o grau

de labilidade é dependente de fatores químicos, físicos e biológicos que interagem com o íon fosfato, matéria orgânica e colóides do solo. Dentre os fatores são citados a atividade dos microrganismos (FERNÁNDEZ et al., 2008), o teor de matéria orgânica, o grau de intemperização do solo, a mineralogia (RESENDE et al., 2011) e a textura do solo (EBERHARDT et al., 2008; TOKURA et al., 2011).

O uso e o manejo do solo alteram a dinâmica e a labilidade do P (FONTANA et al., 2008; PEREIRA et al., 2010) podendo ocorrer menores teores de P total em áreas de mata nativa e maiores concentrações de P orgânico e lábil nessas áreas. A ciclagem de nutrientes em áreas de florestas, por meio da mineralização da matéria orgânica, é capaz de fornecer o P para solução do solo com menor suscetibilidade à precipitação e adsorção na fase mineral (CERRI; VOLKOFF; ANDREAUX, 1991). Além disso, as substâncias húmicas provenientes da decomposição da matéria orgânica competem por sítios de ligação nas cargas positivas, complexando íons de Al e Fe que ocupam possíveis pontos de ligação do P, aumentando a sua labilidade (ANDRADE et al., 2003).

As dinâmicas das formas de P inorgânico e orgânico dependem do manejo dado ao solo, refletindo na habilidade das plantas utilizarem as reservas de P nas formas menos lábeis (MATOS et al., 2006; GATIBONI et al., 2007; GUARDINI et al., 2012). Assim, com a complexidade na disponibilidade do P às plantas em solos tropicais e o fato de ser um recurso de reserva em escassez em nível mundial, se faz importante avaliar o efeito das transformações de áreas e o impacto que causa na forma e labilidade do P.

### **1.2.3 Fracionamento do fósforo**

As formas de P no solo podem ser identificadas e quantificadas por métodos sequenciais que utilizam soluções extratores de P das formas mais lábeis até as não-lábeis. Entre as metodologias mais conhecidas, a caracterização das formas de P no solo proposta por Hedley, Steward e Chauhan (1982) é a mais difundida e indicada para ambientes que sofreram modificações.

As soluções químicas com diferentes forças de extração removem em uma única alíquota de solo inicialmente as formas mais fracamente adsorvidas até o uso

de soluções com maior poder de extração, abrangendo dessa forma todo o espectro de formas do P no solo.

A resina trocadora de ânions (RTA) é a primeira etapa da extração sendo as formas disponíveis de P inorgânico extraídas pela força eletrostática da resina em atrair o P que está na solução do solo. A segunda etapa é feita com bicarbonato de sódio ( $\text{NaCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) com pH a 8,5, cujo propósito é extrair o P orgânico ( $\text{P}_{\text{o BIC}}$ ) e o P inorgânico ( $\text{P}_{\text{i BIC}}$ ) considerados lábeis e que são facilmente extraídos pelas plantas. Para a terceira etapa é usada a solução de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) extraindo formas de P orgânico ( $\text{P}_{\text{o HID-0,1}}$ ) e P inorgânico ( $\text{P}_{\text{i HID-0,1}}$ ) que estão moderadamente lábeis no solo, estando quimiossorvidas nos óxidos de Fe e Al e associado a substâncias húmicas. A quarta etapa sequencial é feita com ácido clorídrico ( $\text{HCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ ) obtendo o P inorgânico ( $\text{P}_{\text{i HCl}}$ ) que está ligado aos fostatos de Ca que são moderadamente lábeis. A quinta etapa é realizada com solução de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) para quantificar o P orgânico ( $\text{P}_{\text{o HID-0,5}}$ ) e P inorgânico ( $\text{P}_{\text{i HID-0,5}}$ ) protegidos fisicamente e de baixa disponibilidade, considerada a forma não-lábil de P no solo. A última etapa consiste na digestão de uma fração do solo utilizada durante todo o processo de extração com ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) concentrado e peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) determinando o P residual, sendo P inorgânico e P orgânico quimicamente estáveis. O P total é considerado a soma de todas as frações que apresentam diferentes graus de disponibilidade para as plantas.

Algumas modificações foram realizadas na metodologia original para aumento da eficiência de extração e facilidade de execução do método. A mais importante foi realizada por Condrón, Goh e Newman (1985) com o uso da solução extratora de  $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  para determinar formas orgânicas e inorgânicas de P que estão fisicamente protegidas no interior de microagregados.

#### **1.2.4 Substâncias húmicas em solos tropicais**

A substituição das áreas de florestas por cultivos agrícolas altera os teores de matéria orgânica no solo por diminuição do fornecimento pela vegetação, e também pelos processos agressivos de abertura, que aceleram a mineralização pelas condições climáticas e biológicas favoráveis na Amazônia (FEARNSIDE et al., 1999).

A matéria orgânica do solo é considerada o principal fator de sustentabilidade da floresta amazônica com destaque aos efeitos positivos nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, em uma região com limitações químicas ao desenvolvimento de plantas (DICK et al., 2005). A decomposição da matéria orgânica é favorecida pela temperatura, umidade, pH e a diversidade microbológica de organismos decompositores na Amazônia, fazendo com que o material seja degradado rapidamente (CAMARGO; SANTOS; GUERRA, 1999).

A decomposição pode ser definida como a despolimerização e oxidação de moléculas relativamente grandes com características definidas, como carboidratos, lipídeos e proteínas que são facilmente atacadas por microrganismos e tem a sua vida útil curta no solo, em moléculas menores, simples e de menor complexidade, tais como ácidos carboxílicos, aminoácidos e  $\text{CO}_2$  (KONONOVA, 1966; ANDRIULLO et al., 1990). É durante a mineralização que ocorre a liberação de nutrientes que estão quimicamente retidos na composição orgânica em forma mineral, destacando o  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , entre outros que nessa fase estão prontamente disponíveis a serem utilizados pelas plantas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Dentre a descrição do material orgânico do solo em decomposição, a denominação de húmus foi dada ao material escuro em avançado estágio de decomposição sem distinção de qual origem é pertencente. Dentro dessa fase é destacada a presença de substâncias húmicas (SH), material que representa 2/3 do carbono orgânico no solo com estrutura química complexa, amorfa, de cor escura e hidrofílica (SCHINITZER, 1991).

As SH apresentam baixa taxa de decomposição no solo e maior tempo de permanência quando comparado as substâncias não húmicas, dessa forma atua permanentemente nas condições físicas e químicas do solo (EYHERAGUIBEL; SILVESTRE; MORARD, 2008). A sua forma e permanência no solo se deve a sua formação em grande parte composta por lignina e a polimerização de produtos de decomposição e síntese microbiana sob a matéria orgânica, isso resulta em uma mistura heterogênea de moléculas com elevadas massas e grupos funcionais distintos que são classificados com base em sua solubilidade em meio aquoso, sendo divididas em três categorias: ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e humina (HU) (STEVENSON, 1994).

Os AF são solúveis em meio ácido ou alcalino, constituídos basicamente por polissacarídeos, aminoácidos e compostos fenólicos, caracterizados por serem mais reativos do que as outras duas frações pela maior quantidade de grupos carboxílicos e fenólicos. Essa fração humificada é considerada de menor massa molecular e maior solubilidade e mobilidade no solo. Em condições de baixa reposição de matéria orgânica, alta taxa de decomposição e condições pluviométricas altas, o AF é considerado a fração que mais se perde para o meio por sua mobilidade, dessa forma podendo ser pouca representativa em áreas em estágios de degradação (STEVENSON, 1994). Do ponto de vista da fertilidade do solo, essa fração é responsável por mecanismos de transporte de cátions dentro da área por ter menor massa e tamanho, o que em contramão pode resultar em perdas de nutrientes associados ao AF por lixiviação (DUCHAUFOR, 1982).

Os AH são solúveis em meio alcalino e insolúveis em meio ácido, com coloração escura e composição por macromoléculas de massa elevada formada por reações de sínteses secundária, conferindo a essa fração o maior teor de C entre as frações (CANELLAS; FAÇANHA, 2004). A contribuição dos AH para a fertilidade do solo está no aumento da CTC de origem orgânica em camadas superficiais no solo, diminuindo a lixiviação de nutrientes e, conseqüentemente, aumentando os seus teores e disponibilidade no solo (SCHNITZER; KODAMA; RIPMEESTER, 1991).

A HU representa o maior teor entre as SH nos solos tropicais, cerca de 50% do C orgânico, e é insolúvel em meio alcalino e meio ácido devido à sua composição variada e à elevada hidrofobicidade (RICE, 2001). A capacidade de reação no solo é pequena, porém essa fração está associada aos componentes inorgânicos do solo, como os elementos químicos em solução do solo, conseqüentemente, sendo responsável pela formação de agregados na maioria dos solos tropicais (MacCARTHY, 2001).

Como as SH representam grande parte do C no solo, a sua reatividade está ligada a maioria das reações químicas que fazem parte da disponibilidade de nutrientes, inclusive nos estoques de C e estruturação do solo, podendo relacionar as suas frações a qualidade do solo. As mudanças no uso de áreas e as práticas inadequadas podem diminuir e causar desequilíbrio nas proporções de AF, AH e HU ou mesmo ao declínio de seus teores (DICK et al., 2009).

De forma geral, as SH atuam no solo nas propriedades químicas, como na regulação da CTC no solo, formando complexo com íons com o Fe, Mn, Cu e Zn e com outros cátions monovalentes e polivalentes, permitindo o deslocamento dentro do solo e tornando-os biodisponíveis para as plantas, além de estruturar o solo formando agregados (ROCHA et al., 1999).

A forma como se dá a distribuição das três frações é dependente do tipo do solo, vegetação e o manejo adotado. Em áreas mais conservacionistas e com altos teores de matéria orgânica, tais como a mata nativa, TPI e TM, os teores são estáveis, participam do complexo de troca de nutrientes e atuam ativamente na disponibilidade de nutrientes as plantas (MOREIRA, 2007). Já em áreas como a de pastagem com baixa adição de material orgânico e queima constantemente para limpeza da área, as SH podem ter pouco ou nenhum efeito na fertilidade do solo (SANTOS; LACERDA, ZINN, 2013).

#### **1.2.5 Fracionamento de substâncias húmicas**

As SH podem ter suas formas determinadas nas frações de AF, AH e HU. Utiliza-se na mesma alíquota de solo soluções extratoras sequenciais de classes moderadas e alcalinas para retirada de cada uma das partes da associação com a fração mineral do solo. O método proposto pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas e com modificações de Benites et al. (2003), determinam operacionalmente as frações húmicas voltado, principalmente, para indicadores do efeito do manejo do solo e/ou estudo da dinâmica de C no solo.

O fracionamento consiste na pesagem de uma massa de solo que represente 30 mg de carbono orgânico total em tubos de centrífuga de 50 ml que são adicionados 20 ml de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e agitado manual para ficar em repouso por 24 horas. Após esse período, as amostras são centrifugadas a 5.000 g por 30 minutos, que finalizado tem o sobrenadante coletado e novamente recebe mais 20 ml de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e agitação manual com posterior repouso de 1 hora. Da mesma forma as amostras são centrifugadas novamente a 5.000 g por 30 minutos e recolhido o sobrenadante que é reservado junto ao anteriormente. O pH do sobrenadante é ajustado para 1,0 com adição de gotas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 20% e aguarda-se decantação por 18 horas. Após esse período o precipitado e decantado é filtrado em membrana de 0,45 mm sob vácuo,

utilizando o filtrado para leitura de AF e o precipitado na membrana para leitura de AH. Ambas frações são aferidas para 50 ml utilizando água destilada. Os tubos de centrífugas tem o solo seco em estufa em 65 °C para determinação da HU. Após a secagem é adicionado 5 ml de  $K_2Cr_2O_7$  0,1667 mol L<sup>-1</sup> e 10 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado, que são digeridos em bloco digestor a 150 °C por 30 minutos sob exaustão. São utilizadas 3 gotas do indicador Ferroin, e a titulação é feita com sulfato ferroso amoniacal 0,25 mol L<sup>-1</sup> para HU e 0,0125 mol L<sup>-1</sup> para AF e HU. Ressalta-se que toda a metodologia extrai de forma presumível o C em SH.

O aumento dos teores de HU, AF e AH em áreas de TPI é capaz de se manter estável sem perdas para o ambiente e consequentemente atuar na melhoria da qualidade da matéria orgânica do solo (MOREIRA, 2007). Cunha et al. (2009) realizaram o fracionamento químico das SH em solos da Amazônia, sob cultivo agrícola e floresta, com e sem horizonte A antropogênico na profundidade de 0 - 20 cm, e encontraram a maior fração correspondente em ambas as áreas a HU, porém é destacado que em comum Latossolo as perdas das frações húmicas por percolação são altas, sendo mais estáveis os teores na área de TPI. Lima et al. (2002) obtiveram resultados semelhantes em estudo nas áreas de TPI e áreas não antropogênicas na Amazônia, com destaque no desequilíbrio da relação AH/AF de 14 em Latossolo e de 4 em área de TPI, demonstrando a capacidade de manter matéria orgânica estável nessa última área.

Madari, Cunha e Soares (2011) encontraram maior teor de AH a AF em solos não antropogênicos na Amazônia, o que os autores consideram o efeito da transformação da área de floresta em cultivo agrícola aumentou a capacidade de lixiviação de substâncias de baixo peso molecular, como o AF. Passos et al. (2007) consideram que o uso de áreas de cultivo agrícola sem acúmulo de matéria orgânica em superfície aumenta as taxas de oxidação, facilitando a mineralização por microrganismos, diminuindo a relação AH/AF das SH.

O estudo das frações de SH pode determinar a qualidade da matéria orgânica do solo após a mineralização nas formas estabilizadas no solo, que modificam as características químicas e físicas no solo, e assim como a sua capacidade de acúmulo, inferindo a quantificação dos teores ocasionados por modificações dados pelo manejo de áreas (BENITES et al., 2003).

### 1.2.6 Formas inorgânicas de N em solos tropicais

Os teores de N total nos solos tropicais são basicamente dependentes do clima da região, do tipo de plantas que compõe a cobertura do solo e principalmente da quantidade e tipo de matéria orgânica do solo (ZINN et al., 2005). Em condições de floresta a diversidade de plantas, é proporcionada maior concentração de N pela cobertura vegetal em superfície e pela capacidade de plantas leguminosas fixadores de N atmosférico serem comumente presentes. Com a derrubada e queima da floresta é perdido grande parte do N por volatilização, e outra parte por lixiviação no perfil do solo, o que limita o aumento ou mesmo à manutenção da produtividade de culturas posteriormente (SOUZA; MELO, 2000; MOREIRA; SIQUEIRA, 2002).

O N no solo é dinâmico e a sua totalidade em solos da Amazônia possui grande dependência da matéria orgânica. A sua concentração no solo, cerca de 98% encontra-se na forma orgânica (ALFAIA, 2006), necessitando de mineralização para a forma de N inorgânico que correspondem a outra pequena parte, representada por  $\text{N-NH}_4^+$  (amônio) ligado a minerais de argila, e por  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_3^-$  (nitrato) e  $\text{N-NO}_2^-$  (nitrito) presentes na solução do solo, sendo essa última forma pouco representativa nos solos tropicais (McLAREN; CAMERON, 1996; CAMARGO; GIANELLO; VIDOR, 1997; GIANELLO et al., 2000).

O N total é a representação de N orgânico somado ao N inorgânico. Em áreas que acumulam matéria orgânica em superfície, como as de floresta, os teores de N total são elevados, reduzindo perdas por imobilização de microrganismos e liberação gradual (GONÇALVES; MENDES; SASAKI, 2001). Porém, com a mudança de cobertura vegetal há a alteração da biomassa microbiana no solo e a diminuição da reposição do material vegetal ao solo, correspondendo a alteração na decomposição da matéria orgânica (CANTARELLA, 1989). Com pouca mobilização de N total no solo, existe a tendência de menor disponibilidade pela redução da mineralização dos resíduos vegetais e o aumento da imobilização da biomassa microbiana, o que pode corresponder a 5% do N total do solo (SOUZA; MELO, 2000).

A disponibilidade do N inorgânico no solo depende de processos de mineralização e imobilização que variam de acordo com o tempo, temperatura, umidade, aeração, pH do solo, constituição do resíduo orgânico em decomposição e a atividade microbiana no solo (AITA; GIACOMINI; HUBNER, 2007). D'Andréa et al.

(2004) calculam por ano a liberação de 2 a 5% do N orgânico é transformado para N inorgânico, ao qual a forma inorgânica a ser disponibilizada dependerá de fatores que inibem a nitrificação e por valores de pH.

O  $\text{N-NH}_4^+$  tem origem da amonificação do N orgânico. O processo realizado sem organismos específicos libera a amônia ( $\text{N-NH}_3$ ) que se combina com água resultando em  $\text{N-NH}_4^+$ , podendo ser absorvido por plantas, sendo não necessariamente a forma preferencial utilização pelas plantas, porém, em condições de pH baixo é a forma mais disponibilizada. Essa forma pode se encontrar adsorvida a minerais de argila, principalmente por causa de sua carga positiva, dissolvido na solução do solo, ou até mesmo passar por processo de nitrificação (RANGEL; SILVA, 2007).

Já no processo de nitrificação há a oxidação da  $\text{N-NH}_3$  ou  $\text{N-NH}_4^+$  a  $\text{N-NO}_3^-$  realizada por microrganismos autotróficos que utilizam essa forma como fonte de energia. O pH em água ideal para a formação de  $\text{N-NO}_3^-$  é entre 6,6 e 8,0 (RANGEL; SILVA, 2007). O  $\text{N-NO}_3^-$  é repelido pela superfície negativa dos coloides do solo, e por isso pode ser lixiviado, vindo a comprometer a disponibilidade de N no solo e a absorção de plantas (BASSO; CERETTA, 2000). Em áreas que utilizam a pastagem ou gramíneas como cultura principal, a decomposição da matéria orgânica favorecerá a forma de  $\text{N-NO}_3^-$  por causa das substâncias excretadas pelas raízes das gramíneas e pela acidez comumente apresentada por esses solos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002; GOPALAKRISHNAN et al., 2007). Essa forma não se liga facilmente aos coloides do solo e fica livre na solução, podendo ser lixiviado ou absorvido pelas plantas e microrganismos.

O decréscimo dos teores de N total em áreas da Amazônia após a conversão de áreas de floresta para áreas de cultivo foi relatado por Andrade, Valentim e Carneiro (2002). Os autores descrevem as altas taxas de mineralização líquida feita por microrganismos em condições de temperatura e umidade favoráveis como responsáveis na diminuição de teores de matéria orgânica, assim como a maior lixiviação do N total em áreas de cultivo. Já Bernoux et al. (1999) encontraram resultados opostos, sendo que a transformação de área de mata nativa em pastagem incrementou os teores de N total no solo na camada de 0 – 20 cm em um Latossolo Vermelho-amarelo distrófico após 10 anos de cultivo em Paragominas, Pará.

D'Andréa et al. (2004) avaliaram as formas de N inorgânico em diferentes manejos do solo em área do Cerrado, tendo como resultado a forma  $\text{N-NH}_4^+$  predominante em todo o perfil da área de floresta e pastagem relacionando ao pH baixo das áreas. Já nas áreas de cultivo agrícola, a forma predominante foi a  $\text{N-NO}_3^-$  atribuindo a calagem como condição favorável aos microrganismos nitrificadores.

Em solos da Amazônia, Alfaia (1997) estudou a disponibilidade de N inorgânico através do uso de plantas leguminosas para adubação em áreas Latossolo, Argissolo e Gleissolo na profundidade de 0 – 30 cm, obtendo para as duas primeiras classes a predominância de  $\text{N-NH}_4^+$ , enquanto no Gleissolo a forma de  $\text{N-NO}_3^-$  preponderou.

### 1.3 REFERÊNCIAS

- AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; HÜBNER, A. P. Nitrificação do nitrogênio amoniacal de dejetos líquidos de suínos em solo sob sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n.1, p. 95-102, 2007.
- ALFAIA, S. S. Caracterização e distribuição das formas do nitrogênio orgânico em três solos da Amazônia Central. **Acta amazonica**, v. 36, n. 2, p. 135-140, 2006.
- ALFAIA, S. S. Mineralização do nitrogênio incorporado como material vegetal em três solos da Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 3, p. 387-392, 1997.
- ANDRADE, C. M. S.; VALENTIM, J. F.; CARNEIRO, J. C. Árvores de Baginha (*Stryphnodendron guianense* (Aubl.) Benth.) em ecossistemas de pastagens cultivadas na Amazônia. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 31, n. 2, p. 574-582, 2002.
- ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n. 6, p.1003-1011, 2003.
- ANDRIULLO, A. E.; GALANTINI, J.; PECORARI, C.; TORIONI, E. Organic soil material in the Pampas of Argentina. **Agrochemical**, v. 34, n. 5-6, p. 475-489, 1990.
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impacto da conversão floresta-pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta amazonica**, v. 41, n. 1, p. 103-114, 2011.
- ARAÚJO, E. A.; LANI, J. L.; AMARAL, E. F.; GUERRA, A. Uso da terra e propriedades físicas e químicas de Argissolo amarelo distrófico na Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 307-315, 2004.
- ARAÚJO, M. S. B.; SALCEDO, I. H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região Nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 4, p. 643-650, 1997.
- ARCHANJO, B. S.; ARAUJO, J. R.; SILVA, A. M.; CAPAZ, R. B.; FALCÃO, N. P. S.; JORIO, A.; ACHETE, C. A. Chemical analysis and molecular models for calcium-oxygen-carbon interactions in black carbono found in fertile Amazonian Anthrosoils. **Environmental Science and Technology**, v. 48, n. 2, p. 7445-7452, 2014.
- BASSO, C. J.; CERETTA, C. A. Manejo do nitrogênio no milho em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 905-915, 2000.
- BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixa custo. **Comunicado técnico 16**, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 7 pp. 2003.

BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; GERALDES, A. P. A.; FERNANDES, S. A. P. Carbono e nitrogênio em solo de uma cronosequência de floresta tropical – pastagem de Paragominas, Pará. **Scientia Agrícola**, v. 56, n. 4, p. 777-783, 1999.

BEZERRA, R. P. M.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Frações de fósforo e correlação com atributos edáficos sob sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária no Cerrado Goiano. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 3, p. 1287-1306, 2015.

BRINKMANN, W. L. F.; NASCIMENTO, J. C. The effect of slash and burn agriculture on plant nutrients in the tertiary region of Central Amazonia. **Turrialba**, v. 23, n. 3, p. 284-290, 1973.

CAMARGO, A. E.; SANTOS, G. A.; GUERRA, J. G. M. Macromoléculas e Substâncias Húmicas. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo em ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Ed. Gênensis, 1999. p. 49.

CAMARGO, F. A. O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Comparative study of five hydrolytic methods in the determination of soil organic nitrogen compounds. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 28, n. 16-16, p. 1303-1309, 1997.

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

CANELLAS, L. P.; FAÇANHA, A. R. Chemical nature of soil humified fractions and their bioactivity. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 3, p. 233-240, 2004.

CANTARELLA, H. Matéria orgânica e nitrogênio do solo. In: BULL, L. T.; ROSOLEM, M. C. A. (Ed.) **Interpretação e análise química do solo e planta para fins de adubação**. Botucatu: Fundação de estudos e Pesquisas Agrícolas e florestais, 1989. p.37-73.

CERRI, C. C.; VOLKOFF, B. ANDREAUX, F. Nature and behaviour of organic matter in soils under natural forest, and after deforestation, burning and cultivation, near Manaus. **Forest Ecology and Management**, v. 38, n. 3-4, p. 247-257, 1991.

CESSA, R. M.; CELI, L.; VITORINO, A. C.; NOVELINO, J. O.; BARBERIS, E. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1153-1162, 2009.

CONDON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance analysis. **European Journal of Soil Science**, v. 36, n. 2, p. 199-207, 1985.

CONDON, L. M.; TIESSEN, H. Interactions of organic phosphorus in terrestrial ecosystems. In: TURNER, B. L., FROSSARD, E. BALDWIN, D. S. (Ed.). **Organic phosphorus in the environment**. Wallingford: CAB international, 2005. p. 295-307.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M.; RHOTON, F. E.; TRAINA, S. J. Quantification and characterization of maghemite in soil derived from volcanic rocks in Southern Brazil. **Clays and Clay Minerals**, v. 47, n. 4, p. 466-473, 1999.

CRAVO, M. S.; SMYTH, T. J.; BRASIL, E. C. Calagem em Latossolo amarelo distrófico da Amazônia e sua influência em atributos químicos do solo e na produtividade de culturas anuais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 895-907, 2012.

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; CANELLAS, L. P.; RIBEIRO, L. P.; BENITES, V. M.; SANTOS, G. A. Soil organic matter and fertility of Anthropogenic Dark Earts (Terra Preta de Índio) in the Brazilian Amazon basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 85-93, 2009.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; GUILHERME, L. R. G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 179-186, 2004.

DALAL, R. C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, v. 29, p. 83-117, 1977.

DICK, D. P.; GONÇALVES, C. N.; DALMOLIN, R. S. D.; KNICKER, H.; KLAMT, E.; KOGEL-KNABER, I.; SIMÕES, M. L.; MARTIN-NETO, L. Characteristics of soil organic matter of different Brazilian Ferrasols under native vegetation as a function of soil depth. **Geoderma**, v. 124, n. 3-4, p. 319-333, 2005.

DICK, D. P.; NOVOTNY, E. H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Química da matéria orgânica do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. (Ed.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: SBCS, 2009. p. 1-67.

DIEZ, J. A.; POLO, A.; DIAZ-BURGOS, M. A.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J.; PICCOLO, M. C. Effect of fallow land, cultivated pasture and abandoned pasture on soil fertility in two deforested amazonian regions. **Scientia agrícola**, v. 54, n. 1-2, p. 45-52, 1997.

DUCHAUFOR, P. **Pedology: pedogenesis and classification**. London: George Allen & Unwin, 1982. 187 p.

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P. R. S.; BECQUER, T.; GUIMARÃES, M. F. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em Latossolos sob pastagens do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1009-1016, 2008.

EYHERAGUIBEL, B.; SILVESTRE, J.; MORARD, P. Effects of humic substances derived from organic waste enhancement on the growth and mineral nutrition of maize. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 10, p. 4206-4212, 2008.

FALCÃO, N. P. S.; BORGES, L. F. Efeito da fertilidade da Terra Preta de Índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (*Carica papaya* L.). **Acta amazonica**, v. 36, n. 4, p. 401-406, 2006.

FALLEIRO, R. M.; SOUZA, C. M.; SILVA, C. S. W.; SEDIYAMA, C. S.; SILVA, A. A.; FAGUNDES, J. L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 6, p. 1097-1104, 2003.

FEARNSIDE, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: history, rates and consequences. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 680-688, 2005.

FEARNSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L.; RODRIGUES, F. J. A.; ROBINSON, J. M. Tropical forest burning in Brazilian Amazônia: Measurement of biomass loading, burning efficiency and charcoal formation at Alatomira, Pará. **Forest Ecology and Management**, v. 123, n. 1, p. 65-79, 1999.

FERNÁNDEZ, R. I. E. J.; NOVAIS, R. F.; NUNES, F. N.; KER, J. C. Reversibilidade do fósforo não-lábil em solos submetidos à redução microbiana e química. I – Alterações químicas e mineralógicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2307-2318, 2008.

FERREIRA, A. O.; MORAES, J. C. S.; HARMS, M. G.; MIARA, S.; BRIEDIS, C.; NETTO, C. Q.; SANTOS, J. B.; CANALLI, L. B. Carbon balance and crop residue management in dynamic equilibrium under a no-till system in Campos Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1583-1590, 2012.

FERREIRA, L. V.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 53, p. 157-166, 2005.

FERREIRA, S. J. F.; LUIZÃO, F. J.; MIRANDA, S. A. F.; SILVA, M. S. R.; VITAL, A. R. T. Nutrientes na solução do solo em floresta de terra firme na Amazônia Central submetida à extração seletiva de madeira. **Acta amazonica**, v. 36, n. 1, p. 59-68, 2006.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; CUNHA, T. J. F.; SALTON, J. C. Fósforo remanescente e correlação com as frações da matéria orgânica em um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes sucessões de cultura em plantio direto. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 14, n. 1, p. 159-164, 2008.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 8, n. 1, p. 142-187, 2013.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, J. P. C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 691-699, 2007.

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

GIANELLO, C.; CAMARGO, F. A. O.; REICHMANN, E.; TEDESCO, M. J. Avaliação da disponibilidade do nitrogênio do solo estimada por métodos químicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1, p. 93-101, 2000.

GIAVENO, C.; RICHARDSON, A.; SIMPSON, R.; BARBERIS, E. Interaction of phytases with minerals and availability of substrate affect the hydrolysis of inositol phosphates. **Soil Biology and fertility of soils**, v. 49, n. 3, p. 491-498, 2010.

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The Terra Preta phenomenon – a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, n. 1, p. 37-41, 2001.

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 601-616, 2001.

GOPALAKRISHNAN, S.; SUBBARAO, G. V.; NAKAHARA, K.; YOSHIHASHI, T.; ITO, O.; MAEDA, I.; ONO, H.; YOSHIDA, M. Nitrification inhibitors from the root tissues of *Brachiaria humidicola*, a tropica grass. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 4, p. 1385-1388, 2007.

GRIMALDI, C.; GRIMALDI, M.; MILLET, A.; BARIAC, T.; BOULEGUE, J. Behaviour of chemical solutes during a storm in a rainforest headwater catchment. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 1, p. 93-106, 2004.

GUARDINI, R.; COMIN, J. J.; SCHIMITT, D. E.; TIECHER, T.; BENDER, M. A.; RHEINHEIMER, D. S.; MEZZARI, C. P.; OLIVEIRA, B. S.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G. Accumulation of phosphorus fractions in typic Hapludalf soil after long-term application of pig slurry and deep pig litter in a no-tillage system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 93, n. 2, p. 215-225, 2012.

HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers: na introduction to nutriente management**. New Jersey: Pearson Education, 2005. p. 215.

HECTH, S. B. Indigenous soil management and the creation of Amazonian Dark Earths: Implications of Kayapó practices. In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. (Ed.). **Amazonian Dark Earths origin, properties and management**. Dordrecht: Kluwer, 2003. p. 355-372.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal**, v. 46, n. 5, p. 970-976, 1982.

IBGE. Estados @. IBGE, Brasília, 20 out. 2015. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/>. Acesso em: 20 out. 2015.

INPE. Taxas anuais de desmatamento – 1988 até 2014. INPE, São José dos Campos, 15 out. 2015. Disponível em: <[http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes\\_1988\\_2014.htm](http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2014.htm)>. Acesso em: 15 out. 2015.

KAUFFMAN, D.; CUMMINGS, D.; WARD, D. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along vegetation gradient in the Brazilian Cerrado. **Journal of Ecology**, v.82, n.3, p.519-531, 1994.

KERN, D. C.; COSTA, M. L. Composição química de solos antrópicos desenvolvidos em Latossolo Amarelo derivados de lateritos. **Geociências**, v. 16, n. 1, p. 141-156, 1997.

KERN, D. C.; D'AQUINO, G.; RODRIGUES, T. E.; FRAZÃO, F. J. L.; SOMBROEK, W.; MYERS, T. P.; NEVES, E. G. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian Dark Earths: origin, properties, management**. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 51-75.

KONONOVA, M. M. **Soil organic matter. Its nature, its role, in soil formation and in soil fertility**. Oxford: Pergamon Press, 1966. p. 544.

LEHMANN, J.; SILVA JÚNIOR, J. P.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in na archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, n. 2, p. 343-357, 2003.

LIMA, H. N.; MELLO, J. W. V.; SCHAEFER, E. G. R.; KER, J. C.; LIMA, A. M. N. Mineralogia e química de três solos de uma topossequência da bacia sedimentar do Alto Solimões, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 59-68, 2006.

LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E. R.; MELLO, J. W. V.; GILKES, R. J.; KER, J. C. Pedogenesis and pre-Columbian land use of “Terra Preta Anthrosols (Indian black earth)” of Western Amazonia. **Geoderma**, v. 110, n. 5, p. 1-17, 2002.

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

LIMA, S. S.; LEITE, L. F. C.; OLIVEIRA, F. C.; COSTA, D. B. Atributos químicos e estoques de carbono e nitrogênio em Argissolo Vermelho-amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no norte do Piauí. **Revista Árvore**, v. 35, n. 1, p. 51-60, 2011.

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

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; BERNINI, T. A.; ZATORRE, N. P.; WADT, P. G. S. Fertilidade do solo e matéria orgânica em Vertissolo e Argissolo sob cobertura florestal e pastagem. **Comunicata Scientiae**, n. 5, v. 1, p. 1-10, 2014.

LUI, G. H.; MOLINA, S. M. G. Ocupação humana e transformação das paisagens na Amazônia brasileira. **Revista de Antropologia**, v. 1, n. 1, p. 266-273, 2009.

MacCARTHY, P. The principles of humic substances. **Soil Science**, v. 166, n. 11, p. 738-751, 2001.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. E.; ANDRADE, B. B.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H. Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após a aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 1, p. 70-76, 2011.

MADARI, B. E.; CUNHA, T. J.; SOARES, R. Organic matter of the Anthropogenic Dark Earths of Amazonia. **Dynamic Soil, Dynamic Plant**, v. 5, n. 1, p. 21-28, 2011.

MARTINS, P. F. S.; CERRI, C. C.; VOLKOFF, B.; ANDREUX, F.; CHAUVEL, A. Consequences of cleaning and tillage on the soil of a natural Amazonian ecosystem. **Forest, Ecology and Management**, v. 38, n. 3-4, p. 273-281, 1991.

MATOS, E. S.; MENDONÇA, E. S.; VILLANI, E. M. A.; LEITE, L. F. C.; GALVÃO, J. C. C. Formas de fósforo no solo em sistemas de milho exclusivo e consorciado com feijão sob adubação orgânica e mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n.4, p. 625-632, 2006.

McDOWELL, R. W.; STEWART, I. The phosphorus composition of contrasting soils in pastoral, native and forest management in Otago, New Zealand: Sequential extraction and <sup>31</sup>P NMR. **Geoderma**, v. 130, n. 1-2, p. 176-189, 2006.

McGRATH, D. A.; DURYEY, M. L.; CROPPER, W. P. Soil phosphorus availability and fine root proliferation in Amazonian agroforests 6 years followin forest conversion. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 83, n. 3, p. 271-284, 2001.

McLAREN, R. G.; CAMERON, K. C. **Soil science: sustainable production and environmental protection**. Auckland: Oxford University Press, 1996. p. 304.

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

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. **Variação das propriedades químicas e físicas do solo e na matéria orgânica em agroecossistemas da Amazônia Ocidental (Amazonas)**. Piracicaba: CENA/USP, 2002. p. 54.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2002. p. 626.

MOREIRA, F.M.S. SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2006. p. 729.

NEVES, E. G.; PETERSON, J. B.; BARTONE, R. N.; SILVA, C.A. Historical and sócio-cultural origins of Amazonian Dark Earths. In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian Dark Earths: origin, properties, management**. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 29-49.

NOVAIS, R. D.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. p. 210.

NOVOTNY, E. H.; HAYES, M. H. B.; MADARI, B. E.; BONAGAMBA, T. J.; AZEVEDO, E. R.; SOUZA, A. A.; SONG, G.; NOGUEIRA, C. M.; MANGRICH, A. S. Lessons from the Terra Preta de Índio of the Amazon Region for the utilisation of charcoal for soil amendment. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 20, n. 6, p. 1003-1010, 2009.

PASSOS, R. R.; RUIZ, H. A.; MENDONÇA, E. S.; CANTARUTTI, R. B.; SOUZA, A. P. Substâncias húmicas, atividade microbiana e carbono orgânico lábil em agregados de um latossolo vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p.1119-1129, 2007.

PAVINATO, P. S.; DAO, T.; ROSOLEM, C. A. Tillage and phosphorus management effects on enzyme-labile bioactive phosphorus availability in Cerrado Oxisols. **Geoderma**, v. 156, n. 3-4, p. 207-215, 2010.

PEREIRA, M. F.; LOSS, A.; BEUTLER, S. J.; TORRES, J. L. R. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 5, p. 508-514, 2010.

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, n. 6, p. 1609-1623, 2007.

RESENDE, J. C. F.; BUSTAMANTE, M. M. C.; MARKEWITZ, D.; KLINK, C. A.; DAVIDSON, E. A. Phosphorus cycling in a small watershed in the Brazilian Cerrado: impacts of frequent burning. **Biogeochemistry**, v. 105, n. 1, p. 105-118, 2011.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; FLORES, A. F. Organic and inorganic phosphorus as characterized by phosphorus -31 by nuclear magnetic resonance in subtropical soils under management systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n. 11-12, p. 1853-1871, 2002.

RICE, J. Humín. **Soil Science**, v. 166, n. 11, p. 848-857, 2001.

ROCHA, J. C.; SARGENTINI JUNIOR, E.; TOSCANO, I. A. S.; ROSA, A. H.; BURBA, P. Multi – method study on aquatic humic substances from the Rio Negro Amazonas state/Brasil. Emphasis on molecular-size classification of their metal contents. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 10, n. 3, p. 169-175, 1999.

SANCHEZ, P. A.; BANDY, D.; VILLARICA, J.; NICHOLAIDES, J.; Amazon basin soils: management for continuous crop production. **Science**, v. 216, n. 4548, p. 821-827, 1982.

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

SANTOS, H. Q.; FONSECA, D. M.; CANTARUTTI, R. B.; ALVAREZ, V.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. Níveis críticos de fósforo no solo e na planta para gramíneas forrageiras tropicais em diferentes idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, p. 173-182, 2002.

SANTOS, L. L.; LACERDA, J. J. J.; ZINN, Y. L. Partição de substâncias húmicas em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 955-968, 2013.

SCHINITZER, M. Soil organic matter – the next 75 years. **Soil Science**, v. 151, n. 1, p. 41-58, 1991.

SCHNITZER, M.; KODAMA, H.; RIPMEESTER, J. A. Determination of the aromaticity of humic substances by X-ray diffraction analysis. **Soil Science Society American Journal**, v. 55, n. 3, p. 745-750, 1991.

SERRÃO, E. A. Possibilites for sustainable agriculture development in the Brazilian Amazon. In: CLUSENER-GODT, M.; SACHS, I. (Ed.). **Brazilian perspectives on sustainable development of the Amazon region**. New York: Parthernon, 1995. p. 259-285.

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

SILVA, C. E. M.; GONÇALVES, J. F. C.; FELDPAUSCH, T. R.; LUIZÃO, F. J.; MORAIS, R. R.; RIBEIRO, G. O. Eficiência no uso dos nutrientes por espécies pioneiras crescidas em pastagens degradadas na Amazônica central. **Acta amazonica**, v. 36, n. 4, p. 503-512, 2006.

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

SMITH, N. J. H. Home gardens as a springboard for agroflorestry development in Amazonia. **International Tree Crops Journal**, v. 9, n. 1, p. 11-30, 1996.

SOMBROEK, W. G. **Amazon Soils – A reconnaissance of the soilsof the Brazilian Amazon region**. Wageningen: Center for Agriculture Publications and Documentation, 1966. p. 101.

SOUZA, K. W.; LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; TEIXEIRA, W. G.; PULROLNIK, K.; CORRÊA, G. R. Phosphorous forms in cultivated Indian Black Earth (Anthrosols) of varying texture in the Brazilian Amazon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1347-1355, 2009.

SOUZA, W. J. O.; MELO, W. J. Teores de nitrogênio no solo e nas frações da matéria orgânica sob diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 885-896, 2000.

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. New York: John Willey, 1994. p. 496.

STUTTER, M. I.; SHAND, C. A.; GEORGE, T. S.; BLACKWELL, M. S. A.; DIXON, L.; BOL, R.; MACKAY, R. L.; RICHARDSON, A. E.; CONDRON, L. M.; HAYGARTH, P. M. Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils. **Geoderma**, v. 257, n. 1-3, p. 29-39, 2015.

TIECHER, T.; SANTOS, D. R.; KAMINSKI, J.; CALEGARI, A. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 271-281, 2012.

TOKURA, A. M.; FURTINI, A. E.; CARNEIRO, L. F.; CURI, N.; LOPES, J. Z.; ALOVISI, A. A. Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes cultivados com arroz. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 171-179, 2011.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil Tillage Research**, v. 84, n. 1, p. 28-40, 2005.

## CAPÍTULO 2 - FORMAS DE P EM ÁREAS DA AMAZÔNIA OCIDENTAL

**RESUMO** – A determinação das formas de P no solo pode ser usada para estudar as variações ocorridas pela transformação da mata nativa em área agrícola. Objetivou-se estudar as formas de P em Latossolo Amarelo sob uso de pastagem, citrus, mata nativa, e em áreas de horizonte A antrópico com uso de citrus em Terra Preta de Índio e citrus em Terra Mulata na Amazônia Ocidental após a abertura de floresta e uso para cultivo agrícola. Foram coletadas três amostras compostas nas profundidades de 0 - 5, 5 - 10 e 10 - 20 cm de cada área na região de Manacapuru, AM, para determinação das formas de P utilizando o fracionamento sequencial em laboratório. O P inorgânico representou a maior parte do P encontrado nas áreas, sendo a forma não-lábil a maior fração. A diminuição dos teores de matéria orgânica influenciou as formas de  $P_{i\ RTA}$  e  $P_{o\ BIC}$ , que em condições tropicais são rapidamente convertidas em formas com maior energia de ligação aos colóides do solo. As áreas de MN, PT, CC e TM apresentaram menor teor de  $P_{i\ HID-0,1}$ ,  $P_{o\ HID-0,1}$  e  $P_{i\ HCl}$  resultado da acidez e baixo teor de Ca no solo, fato contrário foi observado na TPI que apresentou formas moderadamente lábeis em alta concentração. A abertura da floresta para uso agrícola aumentou a capacidade do solo em reter P em formas não-lábil,  $P_{i\ HID-0,5}$ ,  $P_{o\ HID-0,5}$  e  $P_{residual}$  em maior proporção. Já o  $P_{total}$  teve aumento em todas as áreas pela incorporação do P contido na biomassa vegetal após a transformação em cultivo, com expressivos aumentos na TPI pela adição de materiais ricos em P associado ao biocarvão que garantiu a estabilidade acúmulo de teores de P no solo mesmo após a remoção da floresta e uso agrícola.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fracionamento de Fósforo, P Inorgânico, P Orgânico, Solos Amazônicos, Terra Preta de Índio

## 2.1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 60 a abertura e a transformação de áreas de mata nativa para uso agrícola na Amazônia têm aumentado consideravelmente, modificando as características originais de áreas ambientalmente estabilizadas (MOREIRA; MALAVOLTA, 2004). A queima da matéria orgânica do solo pode ser responsável por parte do fornecimento de nutrientes para as plantas, e a baixa fertilidade natural de Latossolos e Argissolos, solos predominantes na região, tendem, em curto tempo, a causar limitações nutricionais para o cultivo de culturas subsequentes (CAMPOS et al., 2012), resultando em abertura de novas áreas para plantio. Com a redução do material orgânico nessas áreas não há a deposição de resíduos orgânicos em superfície, e conseqüentemente, a ciclagem de nutrientes no solo, sendo esta responsável por até 80% do fornecimento de P disponível às plantas nas condições de solo não adubados na Amazônia (VIEIRA et al., 1993; MARTINAZZO et al., 2007).

Em áreas de Terra Preta de Índio (TPI), encontradas em vários pontos da Amazônia existe, por outro lado, alta fertilidade e altos teores de P. Isso é devido às habitações de comunidades indígenas de milhares de anos que adicionaram e acumularam resíduos orgânicos ricos em nutrientes e os eliminaram por meio da queima com diferentes graus de temperatura e tempo de queima, resultando em material de difícil degradação, o biocarvão (SOMBROEK et al., 2002). Ao redor da TPI, a área de Terra Mulata (TM) se destaca por ser mais extensa e o antigo local de agricultura dos indígenas que também sofreu modificações na fertilidade, porém menor quando comparado a TPI e maior quando comparado aos Latossolos da região. Essas áreas são exceções na Amazônia, porém são bastante procuradas pelos moradores da região para a atividade agrícola e pela não necessidade de adubação dessas áreas.

O P é considerado o nutriente mais limitante para a nutrição de plantas em solos tropicais devido à sua adsorção e precipitação com outras formas disponíveis em condições de acidez do solo, sendo o P disponível deficiente em 90% dos solos da região (SILVA et al., 2006). Segundo Falcão e Silva (2004) o teor de P total nos Latossolos da Amazônia situa-se entre 200 a 3.000 mg kg<sup>-1</sup>, porém menos de 0,1% está na solução do solo para absorção de plantas, e em áreas agrícolas os teores

situam-se entre 0,002 e 2 mg L<sup>-1</sup> de P, sendo o uso e manejo da área o fator que determina maior ou menor disponibilidade de P.

O solo com altos teores de matéria orgânica possivelmente tem a maior capacidade de fornecer P ao solo na forma orgânica a ser disponível as plantas. Ao contrário, o P inorgânico torna-se mais importante em áreas sem consideráveis teores de matéria orgânica (SOUZA JÚNIOR et al., 2012). Assim, é possível determinar o impacto da transformação de áreas e seus usos por meio das formas de P encontradas no solo, que podem ser determinadas por extrações sequenciais que retiram o P da amostra de acordo com a labilidade.

A extração sequencial de P proposta por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) permite extrair o P em formas lábeis – formas de P extraídas por resina trocadora de ânions (RTA) e por bicarbonato de sódio (NaHCO<sub>3</sub>); moderadamente lábeis – extraído por hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol L<sup>-1</sup> e por ácido clorídrico (HCl 1 mol L<sup>-1</sup>); e não-lábil – extraído por hidróxido de sódio (NaOH) 0,5 mol L<sup>-1</sup> e por digestão com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> conc.+ MgCl<sub>2</sub> saturado. Com a determinação das formas de P é possível ter o conhecimento da disponibilidade desse nutriente no solo e a sua mudança de acordo com a alteração da floresta para uso agrícola (TIESSEN, STEWART; COLE, 1984).

Assim, objetivou-se com esse trabalho quantificar as formas de P em Latossolo Amarelo sob mata nativa, pastagem, citrus, e em áreas com horizonte A antrópico (Terra Preta de Índio e Terra Mulata também cultivadas com citrus), na Amazônia Ocidental.

## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em propriedades rurais localizadas próximas ao ramal da Costa do Laranjal, entre os quilômetros 10 e 29, no sentido Rio Solimões, distante 84 km de Manaus, em área do município de Manacapuru, estado do Amazonas, localizado nas coordenadas geográficas 3°18'33"S e 60°33'21"W, a 34 metros de altitude. Segundo a classificação de Köppen, a área integra o quadro macroclimático do tipo AmW tropical chuvoso e úmido, com umidade em torno de 85%, temperatura máxima de 31 °C, mínima de 23 °C e média de 26 °C, e precipitação próxima de 2.250 mm anuais.

As áreas estão em uso por pequenos agricultores, próximas umas das outras (raio de aproximadamente 5 km), em relevo plano com predomínio de Latossolo Amarelo distroférico - LAdf (Embrapa, 2013), as quais foram desmatadas em 1980 para a extração de madeiras; o restante da vegetação foi derrubado, sendo utilizado fogo para a limpeza da área, antes do estabelecimento dos cultivos agrícolas.

As áreas utilizadas foram: (MN) mata nativa da floresta Amazônica preservada, com cobertura vegetal primária e com porte variado de espécies, bem drenada, com rica camada de serapilheira em superfície; (TPI) LAdf com horizonte A antrópico, Terra Preta de Índio, desmatada há 35 anos e com cultivo atual de laranja Pêra (seis anos de idade) plantada no espaçamento de 6 x 5 m. Após a abertura da área, a mesma sempre foi cultivada com citrus, com a substituição de plantas velhas por novas na mesma cova, sem calagem e adubação ou movimentação do solo. Os tratos culturais restringiram-se a dessecação de plantas daninhas nas entrelinhas; (TM) LAdf com horizonte A antrópico, Terra Mulata, com mesmo histórico e descrição da TPI; (CC) LAdf sob cultivo de laranja Pêra (plantas com diferentes idades) em áreas com 35 anos após a derrubada da mata. Essa área recebe a aplicação de calcário e adubo mineral na projeção da copa somente uma vez durante todo o plantio, sendo evitada a coleta de solo próxima do local onde foi recebido adubação. Como na TPI e na TM não há preparo ou movimentação do solo, sendo as plantas submetidas também, aos mesmos tratos culturais; (PT) pastagem de *Urochloa brizantha* com 6 anos, formada após a derrubada da floresta. Anualmente é realizada queima com fogo para a renovação do pasto. Não há aplicação de calcário e adubo, ou revolvimento do solo. A área apresentava sinais de degradação do solo.

Os dados foram analisados segundo o delineamento experimental inteiramente casualizado com parcelas subdivididas (áreas x profundidade, tratamento principal e tratamento secundário, respectivamente), com três repetições. As amostras dos solos nas áreas de TPI, TM e CC foram coletadas no centro das entrelinhas das plantas de citrus. A amostragem foi realizada com trado holandês e em três profundidades, de 0 a 5, 5 a 10 e 10 a 20 cm. As áreas foram divididas em três unidades experimentais, cada uma delas com aproximadamente 400 m<sup>2</sup>, sendo retiradas 15 subamostras em cada parte para a formação da amostra composta para cada profundidade. Ao final

da coleta, as amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira com abertura de malha de 2,0 mm e armazenadas.

As amostras de solos tiveram seus atributos químicos e físicos determinados seguindo os métodos de Raij et al. (2001) para pH em  $\text{CaCl}_2$  (1:2,5), Ca, Mg, K, alumínio trocável (Al), P resina e acidez potencial (H + Al). A análise de granulometria do solo foi realizada pelo método pipeta (EMBRAPA, 2011). A CTC potencial foi calculada, somando-se os teores de K, Ca, Mg e H + Al. O carbono orgânico (CO) pelo determinado método de Walkey-Black (NELSON; SOMMERS, 1996), e o carbono orgânico total (COT) foi determinado por combustão a seco em analisador elementar LECO CN628 (Tabela 1).

**Tabela 1.** Caracterização química e granulométrica das áreas nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

| Áreas      | pH<br>( $\text{CaCl}_2$ ) | $\text{Ca}^{2+}$<br>----- | $\text{Mg}^{2+}$<br>----- | $\text{K}^+$<br>----- | $\text{Al}^{3+}$<br>----- | H + Al<br>----- | CTC<br>----- | P<br>mg $\text{dm}^{-3}$ | CO<br>----- | COT<br>g $\text{kg}^{-1}$ | Areia<br>----- | Argila<br>----- |
|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|--------------|--------------------------|-------------|---------------------------|----------------|-----------------|
| 0 - 5 cm   |                           |                           |                           |                       |                           |                 |              |                          |             |                           |                |                 |
| TPI        | 6,3                       | 154                       | 25                        | 1,6                   | 0                         | 22              | 201          | 344                      | 35          | 43                        | 573            | 190             |
| PT         | 3,6                       | 2                         | 1                         | 0,4                   | 20                        | 135             | 138          | 10                       | 29          | 36                        | 583            | 220             |
| MN         | 4,5                       | 33                        | 5                         | 0,9                   | 5                         | 80              | 119          | 74                       | 24          | 32                        | 445            | 190             |
| TM         | 4,3                       | 26                        | 7                         | 0,7                   | 12                        | 98              | 132          | 44                       | 26          | 38                        | 578            | 180             |
| CC         | 3,8                       | 7                         | 2                         | 1,2                   | 43                        | 166             | 176          | 12                       | 30          | 38                        | 648            | 170             |
| 5 - 10 cm  |                           |                           |                           |                       |                           |                 |              |                          |             |                           |                |                 |
| TPI        | 6,3                       | 142                       | 23                        | 1,6                   | 0                         | 22              | 191          | 320                      | 33          | 36                        | 560            | 180             |
| PT         | 3,7                       | 2                         | 1                         | 0,3                   | 20                        | 98              | 101          | 8                        | 16          | 22                        | 532            | 190             |
| MN         | 4,4                       | 28                        | 3                         | 0,5                   | 7                         | 72              | 104          | 63                       | 19          | 27                        | 577            | 210             |
| TM         | 4,0                       | 12                        | 3                         | 0,6                   | 21                        | 135             | 151          | 23                       | 23          | 32                        | 515            | 200             |
| CC         | 3,7                       | 3                         | 2                         | 0,6                   | 44                        | 166             | 172          | 10                       | 27          | 33                        | 631            | 200             |
| 10 - 20 cm |                           |                           |                           |                       |                           |                 |              |                          |             |                           |                |                 |
| TPI        | 5,9                       | 111                       | 16                        | 1,1                   | 0                         | 38              | 166          | 316                      | 24          | 33                        | 611            | 200             |
| PT         | 3,8                       | 2                         | 1                         | 0,3                   | 18                        | 88              | 91           | 6                        | 14          | 21                        | 512            | 220             |
| MN         | 4,3                       | 19                        | 2                         | 0,4                   | 9                         | 80              | 101          | 28                       | 16          | 23                        | 548            | 240             |
| TM         | 3,8                       | 4                         | 2                         | 0,5                   | 27                        | 135             | 142          | 10                       | 19          | 26                        | 579            | 190             |
| CC         | 3,7                       | 2                         | 1                         | 0,5                   | 46                        | 166             | 170          | 7                        | 21          | 25                        | 637            | 190             |

Ca: cálcio; Mg: magnésio; K: potássio; P: fósforo; Al: alumínio trocável; H+Al: acidez potencial; CTC: capacidade de troca de cátions; CO: carbono orgânico; COT: carbono orgânico total; TPI: Terra Preta de Índio; TM: Terra Mulata; MN: mata nativa; CC: Cultura de citrus; e PT: Pastagem.

O fracionamento de P foi realizado seguindo o método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) com modificações de Condrón, Goh e Newman (1985). Foi pesado 0,5 g de solo para cada amostra e armazenado em tubo tipo Falcon. As amostras foram submetidas a extratores do menor ao maior poder de extração na relação 1 g de solo: 20 ml de solução, sequencialmente nas etapas expostas na Figura 1.

1) Resina troca aniônica – RTA (lâmina de dimensões 1,0 x 2,0 cm imersa em 10 mL de água em contato direto com o solo), agitou-se 16 horas no agitador de vaivém (rotação de 33 rpm), retirou-se a lâmina RTA e colocou-se em recipiente com 15 ml de HCl 0,5 mol L<sup>-1</sup> por 90 minutos. Após, agitou-se por 30 minutos em agitador horizontal e centrifugou-se o solo juntamente com a água a 6.000 rpm por 15 minutos descartando o sobrenadante. O P foi determinado no extrato de HCl 0,5 mol L<sup>-1</sup> e a forma final foi de P<sub>i RTA</sub> (inorgânico);

2) Adicionaram-se 10 mL de NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> no solo restante da primeira extração com agitação manual para desprendimento do solo e agitou-se 16 horas no agitador de vaivém. Centrifugou-se à 6.000 rpm por 15 minutos e reservou-se o sobrenadante para determinação do P total e P inorgânico nessa fração, e adicionaram-se 10 ml de NaCl 0,5 mol L<sup>-1</sup>, centrifugando novamente à 6.000 rpm por 5 minutos e adicionou-se o sobrenadante ao extrato previamente reservado, determinando-se a forma final de P<sub>BIC</sub> (inorgânico e orgânico);

3) Acrescentaram-se 10 mL de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> na amostra de solo da etapa anterior e repetiu-se o mesmo processo, determinando a forma final de P<sub>HID-0,1</sub> (inorgânico e orgânico);

4) Foram adicionados 10 mL de HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e idem a etapa anterior, tendo como forma final de P<sub>i HCl</sub> (inorgânico);

5) Adicionaram-se 10 mL de NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> e os procedimentos foram idem a etapa anterior, determinando-se a forma final de P<sub>HID-0,5</sub> (inorgânico e orgânico).

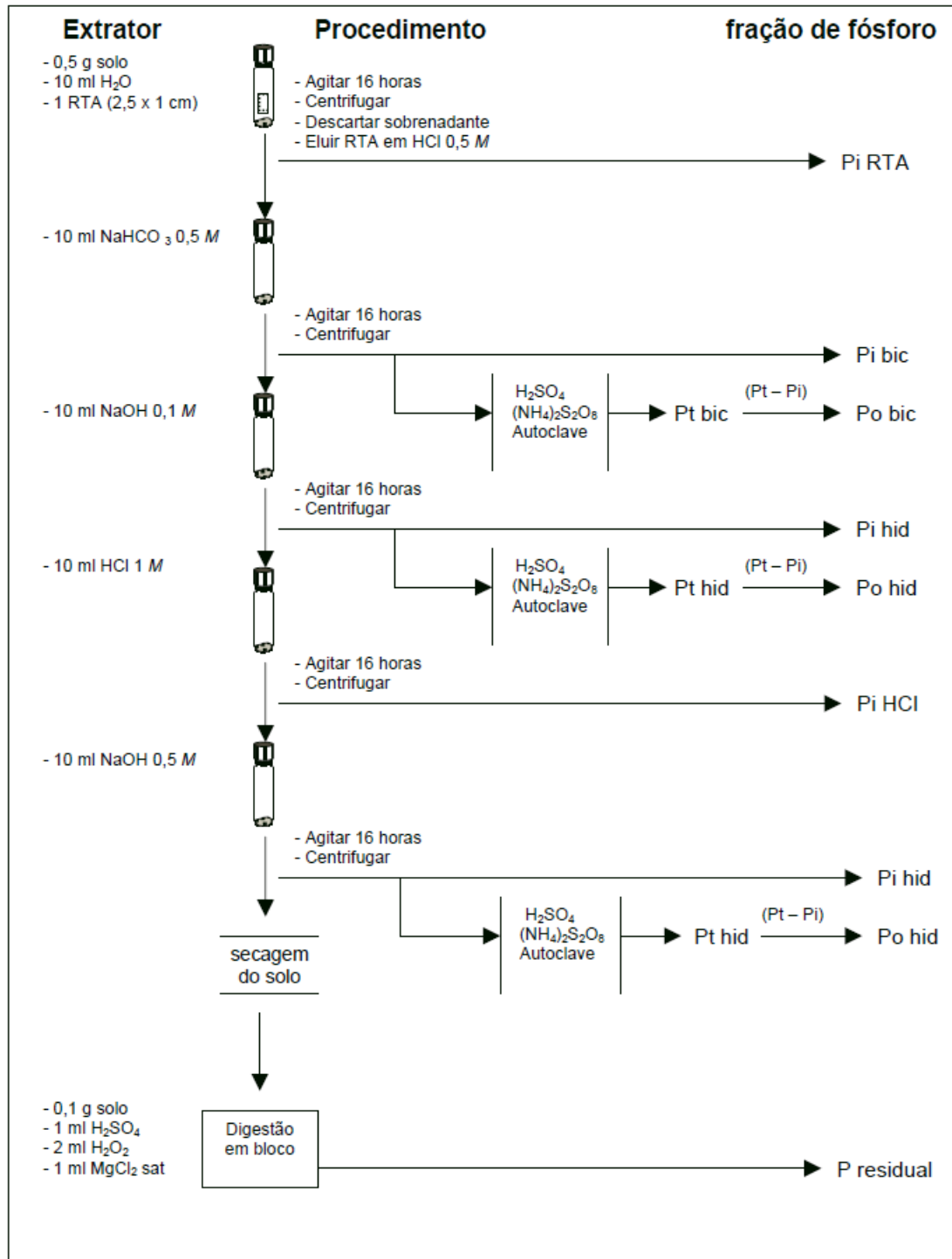


**Figura 1.** Esquema das etapas para realização do fracionamento de P seguindo a metodologia proposta por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) com modificações de Condron, Goh e Newman (1985). Extraído de Gatiboni (2003).

A amostra foi transferida para tubo de digestão e adicionaram-se 1 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado + 1 ml de  $\text{MgCl}_2$  saturado. O tubo de digestão permaneceu em bloco digestor por 1 hora sob a temperatura de  $200\text{ }^\circ\text{C}$ ; quando resfriado, adicionou-se 2 ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  concentrada e voltou-se ao bloco digestor por 1 hora à  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Completou-se ao volume de 50 ml e determinou-se por colorimetria em metodologia proposta por Murphy e Riley (1962).

O P de extratos ácidos (RTA e  $\text{HCl}$   $1,0\text{ mol L}^{-1}$ , além das digestões totais de  $\text{NaHCO}_3$   $0,5\text{ mol L}^{-1}$ ,  $\text{NaOH}$   $0,1\text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{NaOH}$   $0,5\text{ mol L}^{-1}$ ) foi determinado colorimetricamente pelo método de Murphy e Riley (1962), e para os extratos alcalinos ( $\text{NaHCO}_3$   $0,5\text{ mol L}^{-1}$ ,  $\text{NaOH}$   $0,1\text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{NaOH}$   $0,5\text{ mol L}^{-1}$ ), o P inorgânico foi determinado pelo método colorimétrico de Dick e Tabatabai (1977). O somatório das formas de P inorgânico e orgânico em todas as labilidades correspondeu ao P total.

As formas de P do fracionamento de Hedley, inicialmente não estavam associadas a labilidade. A partir do trabalho de Cross e Schlesinger (1995), as formas de P foram relacionadas com a disponibilidade, assumindo-se que a lâmina RTA extrai formas de P inorgânico, de maneira que com  $\text{NaHCO}_3$  extrai-se formas orgânicas e inorgânicas de P. A forma de P moderadamente lábil representa extraído por  $0,1\text{ mol L}^{-1}$  que estão quimiosorvidos aos óxidos de Fe e Al, e por  $\text{HCl}$   $1,0\text{ mol L}^{-1}$  ligado a fosfato de Ca. Já a extração feita por  $\text{NaOH}$   $0,5\text{ mol L}^{-1}$ , extrai as formas de P não-lábil que estariam química e fisicamente protegidas internamente aos agregados, que por sua vez, a digestão para determinação do P residual extrai o P recalcitrante (P orgânico e P inorgânico) remanescente no solo.

Os dados foram avaliados por meio de análise de variância, e quando significativos, aplicou-se o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) para comparação entre as médias.

## 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Formas de P no solo

Para melhor interpretação dos resultados, o fracionamento de P foi dividido em categorias, sendo representado por: P orgânico ( $P_{o\text{ BIC}}$ ,  $P_{o\text{ HID-0,1}}$  e  $P_{o\text{ HID-0,5}}$ ) e P inorgânico ( $P_{i\text{ RTA}}$ ,  $P_{i\text{ BIC}}$ ,  $P_{i\text{ HID-0,1}}$ ,  $P_{i\text{ HCl}}$ ,  $P_{i\text{ HID-0,5}}$  e  $P_{\text{residual}}$ ). De acordo com a labilidade foram classificados em P lábil ( $P_{i\text{ RTA}}$ ,  $P_{i\text{ BIC}}$  e  $P_{o\text{ BIC}}$ ), P moderadamente lábil ( $P_{i\text{ HID-0,1}}$ ,  $P_{o\text{ HID-0,1}}$  e  $P_{i\text{ HCl}}$ ), P pouco lábil ( $P_{i\text{ HID-0,5}}$  e  $P_{o\text{ HID-0,5}}$ ) e P não-lábil ( $P_{\text{residual}}$ ).

HID-0,1 e  $P_i$  HCl) e P não-lábil ( $P_i$  HID-0,5,  $P_o$  HID-0,5 e  $P_{\text{residual}}$ ), de acordo com o proposto por Cross e Schlesing (1995).

### 2.3.1 Frações orgânica e inorgânica

A abertura de áreas de mata nativa para o cultivo agrícola causou variação nos teores de P orgânico e P inorgânico nas áreas e profundidades avaliadas (Figura 2).

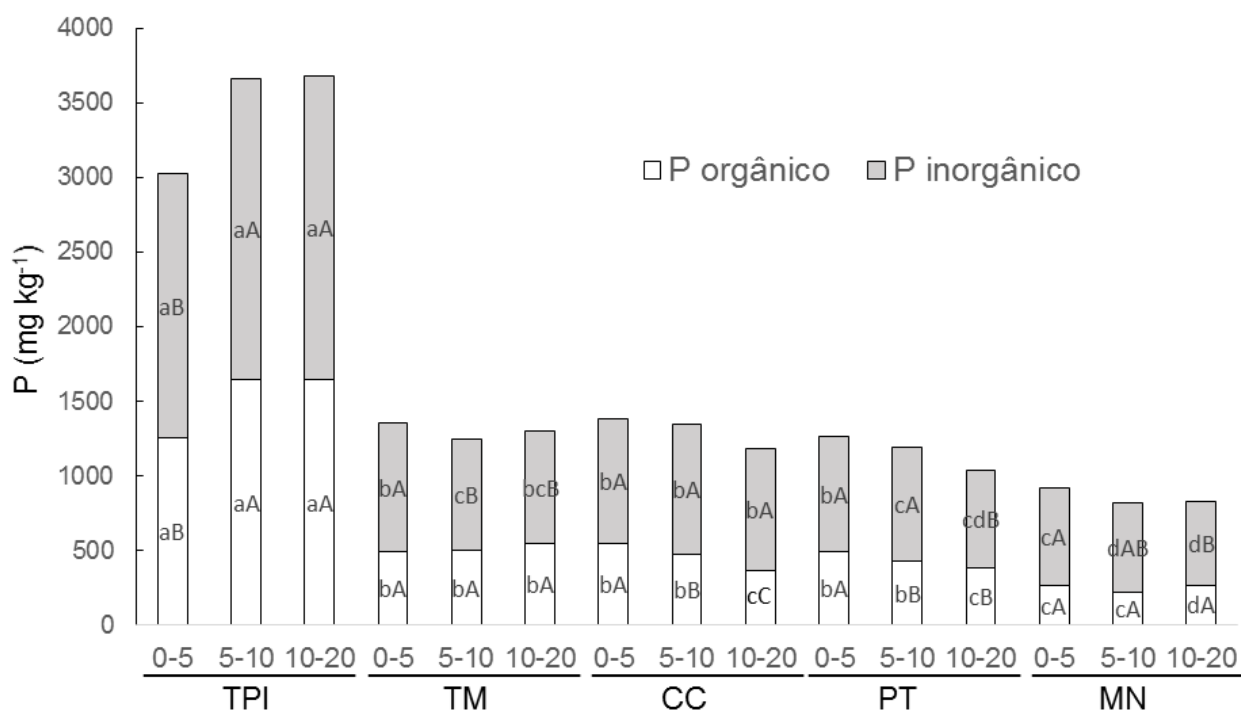


**Figura 2.** Teores de P em forma orgânica ( $P_o$  BIC,  $P_o$  HID-0,1 e  $P_o$  HID-0,5) e inorgânica ( $P_i$  RTA,  $P_i$  BIC,  $P_i$  HID-0,1,  $P_i$  HCl,  $P_i$  HID-0,5 e  $P_{\text{residual}}$ ) em diferentes profundidades (cm) nas áreas de Terra Preta de Índio (TPI), Terra Mulata (TM), mata nativa (MN), cultivo de citrus (CC) e pastagem (PT) na Amazônia Ocidental. \*Médias seguidas de mesma letra (minúscula para comparação entre áreas dentro da mesma profundidade e maiúscula entre as profundidades dentro de cada área) não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

A área de TPI apresentou os maiores teores de P orgânico e inorgânico nas três camadas de solo. A adição de materiais ricos em P de origem apatita biogênica (restos de peixes, tartaruga e humanos) foi capaz de aumentar os teores de P (LIMA et al., 2002), influenciando de forma direta, inclusive na maior participação do P inorgânico,

devido à transformação do material orgânico decomposto em fosfato que foi possivelmente retido pelo biocarvão, diminuindo as perdas por lixiviação e acumulando altos teores de P na área mesmo após a abertura e uso para agricultura (KAMPF; KERN, 2005). Nessa área ainda, o P orgânico na superfície foi significativamente menor que o das camadas inferiores, o que parece contradição em função da baixa mobilidade desse nutriente no solo. As áreas com horizonte A antrópico, entretanto, a localização do P é dependente da maneira como os restos orgânicos foram distribuídos dentro do perfil do solo pelos habitantes indígenas, já que as fontes orgânicas adicionadas foram em grande parte enterradas em variáveis profundidades, resultando na distribuição desuniforme dos teores de nutriente no perfil de solo antropizado (COSTA; KERN, 1999; CUNHA et al., 2009), explicando dessa forma o menor teor de P inorgânico e orgânico na camada de 0 - 5 cm da área de TPI.

Os teores de P inorgânico e orgânico na MN foram em geral, menores que o das outras áreas, atribuindo-se a rápida mineralização da matéria orgânica na camada superficial poder disponibilizar o P orgânico em P inorgânico e o qual é imobilizado pela biomassa vegetal da floresta que retém grande parte do P dessa área (McGRATH; COMERFORD; DURYE, 2000; MAGALHÃES et al., 2013). Quando comparada a área de MN com as demais áreas, verifica-se o aumento do P inorgânico e P orgânico em todas as áreas, principalmente em área de TPI que não apresentou teores similares a TM, ambas com horizonte A antrópico. Já nas áreas de TM, CC e PT observou-se maior teor de P inorgânico na camada de 0 - 5 cm, como resultado da mineralização do P após a derrubada da mata nativa (FERREIRA et al., 2006). O P orgânico apresenta-se em menor proporção pelo rompimento da ciclagem de nutrientes e diminuição da contribuição da matéria orgânica proveniente das plantas em fornecer P ao solo após a retirada da floresta (CROSS; SCHLESINGER, 1995).

Garcia-Montiel et al. (2000) observaram o aumento de P orgânico após a conversão de floresta amazônica em pastagem após 20 anos da abertura da área, resultados semelhantes foram apresentados nesse trabalho. Os autores atribuíram a conversão do P inorgânico em uso de pelas plantas em P orgânico constituinte na biomassa, aumentando a matéria orgânica nessa área e, conseqüentemente, os teores de P orgânico.

### 2.3.2 Labilidades das formas de P

Os teores e formas de P diferenciaram entre as áreas estudadas, principalmente em forma não-lábil, a qual representou o maior teor em todas as áreas e profundidades avaliadas (Figura 3).

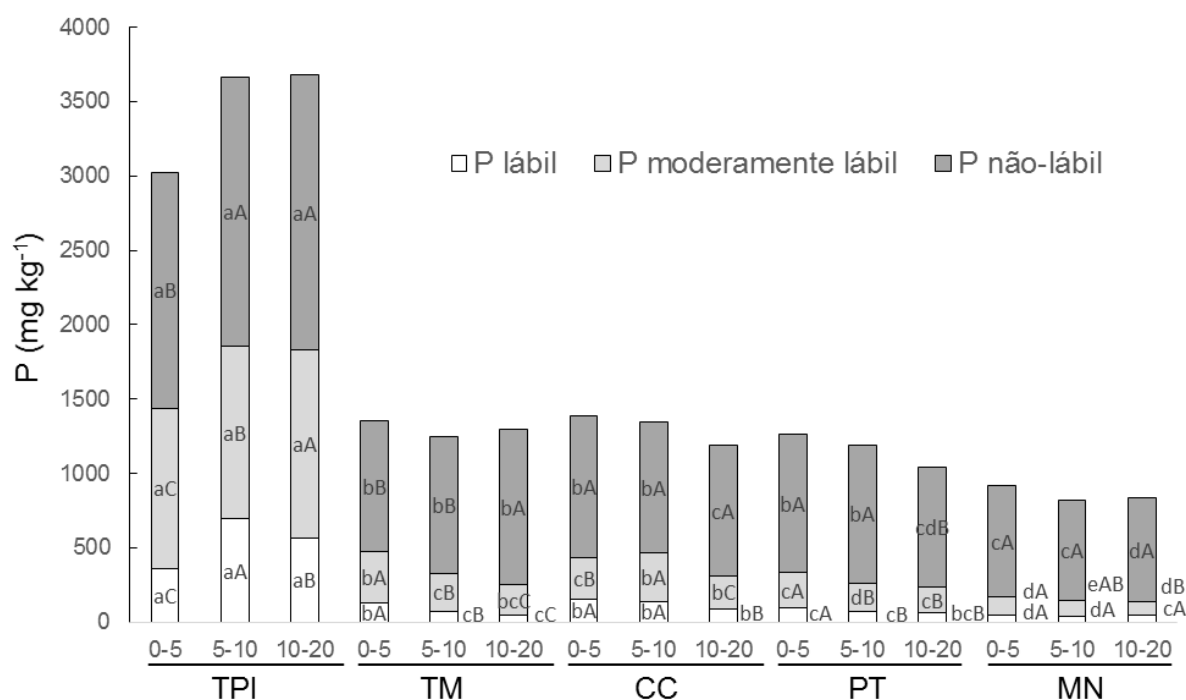


**Figura 3.** Teores de P em forma lábil ( $P_{i\ RTA}$ ,  $P_{o\ BIC}$  e  $P_{i\ BIC}$ ), moderadamente lábil ( $P_{o\ HID-0,1}$ ,  $P_{i\ HID-0,1}$  e  $P_{i\ HCl}$ ) e não-lábil ( $P_{o\ HID-0,5}$ ,  $P_{i\ HID-0,5}$  e  $P_{residual}$ ) em diferentes profundidades (cm) nas áreas de Terra Preta de Índio (TPI), Terra Mulata (TM), mata nativa (MN), cultivo de citrus (CC) e pastagem (PT) na Amazônia Ocidental. \*Médias seguidas de mesma letra (minúscula para comparação entre áreas dentro da mesma profundidade e maiúscula entre as profundidades dentro de cada área) não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

A forma de P lábil foi maior na TPI quando comparada com as demais áreas, sendo na camada de 5 – 10 cm, o maior valor encontrado. A ocupação dos possíveis sítios ligantes do P com a fase sólida na TPI por outros elementos (SOUZA et al., 2009), que associado ao pH alto possibilita formas mais disponíveis de P (VU; TANG; AMSTRONG, 2008). Ao mesmo tempo, em função da dinâmica do P, ele pode se

precipitar com outros elementos, como o Ca, favorecendo o aumento de formas moderadamente lábeis.

De maneira geral, nas áreas TM, CC, PT e MN, em todas as profundidades avaliadas, apresentou a maior parte do P retido na fração não-lábil (aproximadamente 70% do P), possivelmente em função da formação de fortes ligações com minerais 1:1, óxidos de Fe e Al, pH baixo e teor alto de argila. A forma de P moderadamente lábil, representada por P ligado ao Ca, aos óxidos de Fe e Al, e na superfície da caulinita em moderada energia, representou ser pouco reativa com a fração mineral do solo nessas áreas, possivelmente pela maior adsorção do P prevalecer em formas não-lábil em solos tropicais, adsorvendo o P em ligações de maior energia independente do uso da área após o desmatamento (MORAES et al., 1996). Da mesma forma, o P lábil foi determinado em menor proporção nas áreas e profundidades estudadas, com exceção da TPI, vindo a confirmar a deficiência de P disponível às plantas em solos intemperizados e com baixa capacidade de solubilizar em curto espaço de tempo, o P preferencialmente retido em formas de baixa solubilidade (TATE; SALCEDO, 1988; FERNANDES et al., 2002; SOUZA et al., 2007).

### **2.3.2.1 Formas de P lábil**

Os teores de P lábil em forma de  $P_{i\ RTA}$ ,  $P_{i\ BIC}$  e  $P_{o\ BIC}$  diferiram entre as áreas e profundidades avaliadas (Tabela 2).

O  $P_{i\ RTA}$ ,  $P_{i\ BIC}$  e  $P_{o\ BIC}$  aumentaram em todas as áreas a partir da MN. Considerando a rápida decomposição da matéria orgânica em solos tropicais e a demanda por utilização de P pela densa vegetação pode ocorrer diminuição das formas lábeis no solo (CHEN et al., 2003), contribuindo para a instabilidade dos teores principalmente do  $P_{o\ BIC}$  (ROCHA et al., 2005). A contribuição da derrubada e queima da vegetação para transformação em área agrícola adicionou consideráveis quantidades de P na forma lábil ( $P_{i\ RTA}$ ,  $P_{i\ BIC}$  e  $P_{o\ BIC}$ ) nas áreas, mas Garcia-Montiel et al. (2000) chamaram a atenção para o manejo adequado do solo, uma vez que essas mesmas formas de P após 9 anos em área de cultivo decaem após a retirada da floresta, em função da adsorção e precipitação, atingindo valores abaixo aos que eram encontrados na floresta.

**Tabela 2.** Teores de P em forma lábil ( $P_{i\ RTA}$ ,  $P_{i\ BIC}$  e  $P_{o\ BIC}$ ) em diferentes profundidades nas áreas da Amazônia Ocidental.

| Prof.<br>(cm)                                       | TPI    | TM    | MN    | CC     | PT     | Média |
|-----------------------------------------------------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|
| <b><math>P_{i\ RTA}</math> (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |        |       |       |        |        |       |
| 0-5                                                 | 225 aB | 52 bA | 10 dA | 48 bA  | 15 cA  | 70    |
| 5-10                                                | 173 aC | 22 cB | 10 dA | 45 bA  | 10 dB  | 52    |
| 10-20                                               | 230 aA | 12 cC | 7 dA  | 21 bB  | 7 dB   | 56    |
| Média                                               | 209    | 29    | 9     | 38     | 11     | 59    |
| <b><math>P_{i\ BIC}</math> (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |        |       |       |        |        |       |
| 0-5                                                 | 68 aC  | 21 bA | 13 bA | 49 aA  | 19 bA  | 34    |
| 5-10                                                | 240 aA | 16 cA | 8 cA  | 39 bAB | 14 cA  | 63    |
| 10-20                                               | 156 aB | 11 bA | 7 cA  | 26 bB  | 9 bA   | 42    |
| Média                                               | 155    | 16    | 9     | 38     | 14     | 46    |
| <b><math>P_{o\ BIC}</math> (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |        |       |       |        |        |       |
| 0-5                                                 | 67 aC  | 59 bA | 23 cB | 56 bA  | 63 abA | 54    |
| 5-10                                                | 281 aA | 37 dB | 17 eC | 55 bA  | 47 cB  | 88    |
| 10-20                                               | 179 aB | 23 dC | 35 cA | 42 bcB | 50 bB  | 66    |
| Média                                               | 176    | 40    | 25    | 51     | 53     | 69    |

\*Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). TPI: Terra Preta de Índio; TM: Terra Mulata; MN: Mata nativa; CC: Cultivo de citrus; PT: Pastagem.

Os teores de  $P_{o\ BIC}$  encontrados na PT reforçam a necessidade de suprimento de P, tendo em vista a decomposição da matéria orgânica do solo e a interrupção na ciclagem de nutrientes. As formas de  $P_{i\ RTA}$  e  $P_{i\ BIC}$ , com o tempo estão passíveis de interações na área de PT, principalmente em camadas mais profundas pelas condições químicas favoráveis a adsorção, diminuindo o P de fácil reposição para a solução do solo. Fato semelhante pode ser verificado na área TM, uma vez que a capacidade de retenção de  $P_{o\ BIC}$  é maior, demonstrando que a reposição é principalmente oriunda da matéria orgânica (PAVINATO; ROSOLEM, 2008; RESENDE et al., 2011).

Diferentemente das demais áreas, a TPI apresentou os maiores teores de  $P_{i\ RTA}$ ,  $P_{i\ BIC}$  e  $P_{o\ BIC}$  em todas as profundidades estudadas. As altas quantidades do  $P_{i\ RTA}$  podem ser atribuídas ao bloqueio de sítios de adsorção de P no solo (óxidos de Fe e Al, e Al em solução) por grupos funcionais carboxílicos e fenólicos da matéria

orgânica do solo encontrada em grande parte em forma de biocarvão com alta capacidade de troca de cátions e ânions e ao alto pH, disponibilizando o P em formas menos complexas, complementando os resultados como o alto pH um fator de redução de adsorção do P (HUE, 1991).

### 2.3.2.2 Formas de P moderadamente lábil

As áreas apresentaram diferentes teores do P moderadamente lábil nas profundidades avaliadas (Tabela 3).

**Tabela 3.** Teores de P em forma moderadamente lábil ( $P_{i \text{ HID-0,1}}$ ,  $P_{o \text{ HID-0,1}}$  e  $P_{i \text{ HCl}}$ ) em diferentes profundidades nas áreas da Amazônia Ocidental.

| Prof. (cm)                                                     | TPI    | TM     | MN     | CC     | PT     | Média |
|----------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| <b><math>P_{i \text{ HID-0,1}}</math> (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |        |        |        |        |        |       |
| 0-5                                                            | 366 aC | 181 bA | 47 dA  | 111 cB | 114 cA | 164   |
| 5-10                                                           | 451 aA | 115 cB | 34 eB  | 167 bA | 95 dB  | 172   |
| 10-20                                                          | 413 aB | 78 cC  | 29 eB  | 103 bB | 62 dC  | 137   |
| Média                                                          | 410    | 125    | 36     | 127    | 90     | 158   |
| <b><math>P_{o \text{ HID-0,1}}</math> (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |        |        |        |        |        |       |
| 0-5                                                            | 493    | 157    | 78     | 162    | 122    | 202 A |
| 5-10                                                           | 510    | 137    | 73     | 149    | 98     | 194 A |
| 10-20                                                          | 496    | 122    | 59     | 121    | 106    | 181 B |
| Média                                                          | 499 a  | 138 b  | 70 d   | 144 b  | 109 c  | 192   |
| <b><math>P_{i \text{ HCl}}</math> (mg kg<sup>-1</sup>)</b>     |        |        |        |        |        |       |
| 0-5                                                            | 217 aB | 2,9 bA | 0,0 bA | 7,6 bA | 1,4 bA | 45,8  |
| 5-10                                                           | 204 aC | 1,3 bA | 0,1 bA | 6,2 bA | 0,0 bA | 42,3  |
| 10-20                                                          | 360 aA | 4,9 bA | 0,0 bA | 0,8 bA | 0,0 bA | 73,2  |
| Média                                                          | 260    | 3,1    | 0,0    | 4,9    | 0,5    | 53,8  |

\*Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). TPI: Terra Preta de Índio; TM: Terra Mulata; MN: Mata nativa; CC: Cultivo de citrus; PT: Pastagem.

Observando-se os teores de  $P_{i \text{ HID-0,1}}$  representado pelo P adsorvido em óxidos de Fe e Al, nota-se que a partir da MN, a fixação de P aumentou após o uso para agricultura independentemente do uso da área. A exposição da matéria orgânica aos efeitos da mineralização e a baixa taxa de reposição após a derrubada e queimada

em áreas agrícolas, diminui a presença de grupos orgânicos que competiam pelas cargas que adsorvem P no solo (NOVAIS; SMYTH, 1999). As áreas de PT, CC e TM foram mais propensas em reter essa forma de P em camadas superficiais, inferindo-se assim, a possibilidade de formação de complexos que diminuem a disponibilidade do P (ROCHA et al., 2005).

Apesar da área TPI nas profundidades estudadas apresentar os maiores teores de  $P_{i\text{ HID-0,1}}$ , Souza et al. (2009) relataram que essa forma de P em TPI indica a formação de compostos estáveis e menos solúveis de oxihidróxidos de Fe e Al. Segundo os autores, em condições de necessidade de suprimento de P na solução do solo, isso será realizado mais facilmente que nas outras áreas, em função da presença de maior quantidade de ligantes às cargas da fração coloidal.

De maneira semelhante as demais formas moderadamente lábeis, o  $P_{i\text{ HCl}}$ , representado pelo fosfato de cálcio (P ligado ao Ca), foi encontrado em maior quantidade na TPI na camada de 10 – 20 cm, sendo esse o resultado atribuído a incorporação de materiais orgânicos ricos em Ca e P nas camadas mais profundas, que associado ao biocarvão manteve altos teores estabilizados na fase mineral do solo. Adicionalmente, alto pH do solo, característico em áreas de TPI, desprotona hidroxilas de radicais livres diminuindo a adsorção entre o fosfato e a fração adsorvente do solo, aumentando os teores de P disponível na solução. Por sua vez, o P disponível se precipita com o Ca trocável formando fosfatos bi e tricálcicos, diminuindo o P disponível em solução (NOVAIS; SMYTH, 1999; SOUZA et al., 2007; QUESADA et al., 2010). Em condições de acidez, como nas áreas de TM, CC, PT e MN, essa reação não ocorre, podendo até ser nula como na MN e PT nas profundidades de 0 – 5, 10 – 20 cm e 5 - 10 e 10 - 20 respectivamente (Tabela 3).

Souza et al. (2009) observaram a predominância das formas de fosfatos de Ca em TPI, atribuindo isso, a forma de apatita biogênica que foi adicionada ao solo no passado. De maneira oposta, em outros Latossolos encontrados na Amazônia, Markewitz et al. (2002) relataram a diminuição de Ca e P em áreas de floresta após o desmatamento; o baixo pH naturalmente encontrado foi determinante na não formação de fosfato de Ca.

### 2.3.2.3 Formas de P não-lábil e P total

As formas de P não-lábil representadas por  $P_{i\text{ HID-0,5}}$ ,  $P_{o\text{ HID-0,5}}$  e  $P_{\text{residual}}$ , além do P total, foram significativamente diferentes entre as áreas e profundidades estudadas após a abertura de floresta para o cultivo agrícola (Tabela 4).

**Tabela 4.** Teores de P em forma não-lábil ( $P_{i\text{ HID-0,5}}$ ,  $P_{o\text{ HID-0,5}}$  e  $P_{\text{residual}}$ ) e P total em diferentes profundidades nas áreas da Amazônia Ocidental.

| Prof. (cm)                                                    | TPI    | TM      | MN      | CC      | PT      | Média |
|---------------------------------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|-------|
| <b><math>P_{i\text{ HID-0,5}}</math> (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |        |         |         |         |         |       |
| 0-5                                                           | 371 aB | 170 bB  | 176 bA  | 198 bA  | 189 bA  | 221   |
| 5-10                                                          | 451 aA | 200 bA  | 146 cB  | 202 bA  | 174 bcA | 235   |
| 10-20                                                         | 363 aB | 195 bA  | 163 bAB | 193 bA  | 165 bA  | 216   |
| Média                                                         | 395    | 188     | 162     | 198     | 176     | 224   |
| <b><math>P_{o\text{ HID-0,5}}</math> (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |        |         |         |         |         |       |
| 0-5                                                           | 695 aC | 275 bB  | 162 cB  | 328 bA  | 309 bA  | 354   |
| 5-10                                                          | 853 aB | 327 bB  | 125 cA  | 269 bA  | 279 bAB | 371   |
| 10-20                                                         | 967 aA | 405 bA  | 174 cA  | 201 cB  | 229 cB  | 395   |
| Média                                                         | 839    | 336     | 154     | 266     | 272     | 373   |
| <b><math>P_{\text{residual}}</math> (mg kg<sup>-1</sup>)</b>  |        |         |         |         |         |       |
| 0-5                                                           | 521 aA | 436 bA  | 411 bA  | 425 bB  | 428 bB  | 444   |
| 5-10                                                          | 503 aA | 392 bB  | 409 bA  | 415 bB  | 475 aA  | 439   |
| 10-20                                                         | 514 aA | 447 bcA | 357 dB  | 478 abA | 413 cB  | 442   |
| Média                                                         | 513    | 425     | 392     | 439     | 439     | 442   |
| <b>P total (g kg<sup>-1</sup>)</b>                            |        |         |         |         |         |       |
| 0-5                                                           | 3,0 aB | 1,4 bA  | 0,9 cA  | 1,4 bA  | 1,3 bA  | 1,6   |
| 5-10                                                          | 3,7 aA | 1,2 bcA | 0,8 dA  | 1,4 bA  | 1,2 cA  | 1,7   |
| 10-20                                                         | 3,7 aA | 1,3 bA  | 0,8 dA  | 1,2 bcB | 1,0 cB  | 1,6   |
| Média                                                         | 3,5    | 1,3     | 0,8     | 1,3     | 1,2     | 1,6   |

\*Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). TPI: Terra Preta de Índio; TM: Terra Mulata; MN: Mata nativa; CC: Cultivo de citrus; PT: Pastagem.

Em comparação à MN observou-se aumento das formas de  $P_{i\text{ HID-0,5}}$  nas demais áreas, principalmente na TPI. O P contido nessas duas formas está ligado com alta energia aos coloides do solo (óxidos e caulinita), principalmente por ligação do tipo monodentada e bidentada (TATE; NEWMAN, 1982). Essa interação não permite o

acesso das plantas para o uso do P, além da interação com os colóides do solo proporcionar baixa acessibilidade ao ataque de microorganismos, dificultando ainda mais a reversão dessa forma de P para forma disponível (TIESSEN; SALCEDO; SAMPAIO, 1992). O processo de conversão da área aumentou quantitativamente a capacidade do solo em reter o P com maior força, ocorrência comum em solos intemperizados, de baixa saturação por bases, ácidos e com decréscimo nas quantidades de matéria orgânica (QUESADA et al., 2010).

Em resultado semelhante às outras formas não-lábil, o  $P_{\text{residual}}$  aumentou em áreas após a conversão da MN em área agrícola, principalmente na TPI. A forma mais recalcitrante, constituída pelo P inorgânico insolúvel e de mais difícil disponibilidade, tem relação com sítios de adsorção de fosfato presente em argilas e o próprio material de origem do solo (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001).

O  $P_{\text{total}}$  foi definido como o somatório de todas as frações. Como resultado, observou-se aumento dos teores de P total após a conversão da floresta em área agrícola nas camadas superficiais, possivelmente pela queima do material orgânico da floresta e decomposição de grande parte do material vegetal que fazia parte dessas áreas ocorrer em superfície do solo (McGRATH; DURYEY; CROPPER, 2001; McDOWELL; STEWART, 2006). A área de MN, como enfatizado anteriormente, possui menor teor de P total no solo quando comparada as demais áreas, por estar mobilizado na constituição de árvores e demais estruturas orgânicas. Cunha et al. (2007) observaram o P total em áreas agrícolas está ligado aos minerais do solo, o que aumenta a dependência da mineralização da matéria orgânica para formas disponíveis. Como exemplo, o maior teor de  $P_{\text{total}}$  em TM, CC e PT não garantem que esse P está em uso para as plantas, pois 70% do P total está em formas não-lábil.

Ao contrário das demais áreas, a TPI teve seu aumento da concentração de  $P_{\text{total}}$  de origem de materiais orgânicos ricos em P que associado ao biocarvão se mantém estável e em altos teores (GLASER et al., 2001; GLASER; BIRK, 2012).

## 2.4 CONCLUSÕES

A transformação da floresta em áreas agrícolas alterou as formas de P no solo aumentando o P total do solo, porém as reservas lábeis para utilização de plantas diminuíram.

A Terra Preta de Índio apresentou os maiores teores de todas as formas de P analisadas, demonstrando a incorporação de materiais ricos em P associado ao biocarvão presente nessa área foi determinante para o aumento e estabilidade do P no solo, mesmo após a remoção da floresta e uso agrícola.

## 2.5 REFERÊNCIAS

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

CHEN, C. R.; CONDRON, L. M.; DAVIS, M. R.; SHERLOCK, R. R. Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand. **Forest Ecology and Management**, v. 177, n. 3, p. 539-557, 2003.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by  $^{31}\text{P}$  nuclear magnetic resonance analysis. **European Journal of Soil Science**, v. 36, n. 2, p. 199-207, 1985.

COSTA, M. L.; KERN, D. C. Geochemical signatures of tropical soils with archaeological black earth in the Amazon, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 66, n. 1-2, p. 369-385, 1999.

CROSS, A. F.; SCHLESINGER, W. H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, v. 64, n. 3, p. 197-214, 1995.

CUNHA, G. M.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; COSTA, G. S.; VELLOSO, A. C. X. Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no norte Fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 667-672, 2007.

CUNHA, T. J. F.; MADDARI, B. E.; CANELLAS, L. P.; RIBEIRO, L. P.; BENITES, V. M.; SANTOS, G. A. Soil organic matter and fertility of Anthropogenic Dark Earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian Amazon Basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 85-93, 2009.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Enviromental Quality**, v. 6, n. 1, p. 82-85, 1977.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. p. 230.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 2013. p. 167.

FALCÃO, N. P. S.; SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 3, p. 337-342, 2004.

FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V.; FURTINI, A. E.; CURTI, N. Formas de fósforo em solos de várzea e biodisponibilidade para o feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 3, p. 373-383, 2002.

FERREIRA, S. J. F.; LUIZÃO, F. J.; MIRANDA, S. A. F.; SILVA, M. S. R.; VITAL, A. R. T. Nutrientes na solução do solo em floresta de terra firme na Amazônia Central submetida à extração seletiva de madeira. **Acta amazonica**, v. 36, n. 1, p. 59-68, 2006.

GARCIA-MONTIEL, D. C.; NEILL, C.; MELILLO, J.; THOMAS, S.; STEUDLER, P. A.; CERRI, C. C. Soil phosphorus transformations following forest clearing for pasture in the Brazilian Amazon. **Soil Science Society of America**, v. 64, n. 5, p. 1792-1804, 2000.

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

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The Terra Preta phenomenon – a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, n. 1, p. 37-41, 2001.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal**, v. 46, n. 5, p. 970-976, 1982.

HUE, N. V. Effects of organic acids/anions on sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, v. 152, n. 6, p. 463-471, 1991.

KAMPF, N.; KERN, D. C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. **Tópicos de Ciência do Solo**, v. 4, n. 1, p. 277-320, 2005.

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

MAGALHÃES, S. S. A.; WEBER, O. L. S.; SANTOS, C. H.; VALADÃO, F. C. A. Estoque de nutrientes sob diferentes sistemas de uso do solo de Colorado do Oeste. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 1, p. 65-74, 2013.

MARKEWITZ, D.; DAVIDSON, E.; MOUTINHO, P.; NEPSTAD, D. Nutrient loss and redistribution after forest clearing on a highly weathered soil in Amazonia. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. 177-199, 2004.

MARTINAZZO, R.; RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 563-570, 2007.

McDOWELL, R. W.; STEWART, I. The phosphorus composition of contrasting soils in pastoral, native and forest management in Otago, New Zealand: Sequential extraction and  $^{31}\text{P}$  NMR. **Geoderma**, v. 130, n. 1-2, p. 176-189, 2006.

McGRATH, D. A.; COMERFORD, N. B.; DURYEY, M. L. Litter dynamics and monthly fluctuations in soil phosphorus availability in an Amazonian agroforest. **Forest Ecology and Management**, v. 131, n. 1-3, p. 167-181, 2000.

McGRATH, D. A.; DURYEY, M. L.; CROPPER, W. P. Soil phosphorus availability and fine root proliferation in Amazonian agroforests 6 years following forest conversion. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 83, n. 3, p. 271-284, 2001.

MORAES, J. F. L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. **Geoderma**, v. 70, n. 1, p. 63-81, 1996.

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

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, n. 1, p. 31-36, 1962.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D. L.; PAGA, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMMER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis: Chemical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 961-1010.

NOVAIS, R. D.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. p. 210.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo – decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 911-920, 2008.

QUESADA, C. A.; LLOYD, J.; SCHWARZ, M.; PATINO, S.; BAKER, T. R.; CZIMECZIK, C.; FYLLAS, N. M.; MARTINELLI, G. B.; NARDOTO, G. B.; SCHMERLER, A. J. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. **Biogeosciences**, v. 7, n. 1, p. 1515-1541, 2010.

RESENDE, J. C. F.; MARKEWITZ, D.; KLINK, C. A.; BUSTAMANTE, M. M. C.; DAVIDSON, E. A. Phosphorus cycling in a small watershed in the Brazilian Cerrado: impacts of frequente burning. **Biogeochemistry**, v. 105, n. 1, p. 105-118, 2011.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 1, p. 151-160, 2001.

ROCHA, A. T.; DUDA, G. P.; NASCIMENTO, C. W. A.; RIBEIRO, M. R. Fracionamento do fósforo e avaliação dos extratores do P-disponível em solos da Ilha de Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 178-184, 2005.

SILVA, G. R.; SILVA JÚNIOR, M. L.; MELO, V. S. Efeitos de diferentes usos da terra sobre as características químicas de um latossolo amarelo do Estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 36, n. 2, p. 151-158, 2006.

SOMBROEK, W. G.; KERN, D.; RODRIGUES, T.; CRAVO, M. S.; JARBAS, T. C.; WOODS, W.; GLASER, B. Terra Preta and Terra Mulata: Pre-Colombian Amazon Kitchen midden and agricultural fields, their sustainability and their replication. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 17., 2002, Thailand. **Anais**. Thailand: WSSS, 2002, p. 1-9.

SOUZA JÚNIOR, R. F.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, H. C.; FREIRE, F. J.; ARRUDA, J. A. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 159-169, 2012.

SOUZA, K. W.; LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; TEIXEIRA, W. G.; PULROLNIK, K.; CORRÊA, G. R. Phosphorous forms in cultivated Indian Black Earth (Anthrosols) of varying texture in the Brazilian Amazon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1347-1355, 2009.

SOUZA, R. F.; FAQUIN, V.; ANDRADE, A. T.; TORRES, P. R. F. Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1533-1544, 2007.

TATE, K. R.; NEWMAN, R. K. Phosphorus fractions of a climosequence of soils in New Zealand tussock. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, v. 3, p. 91-196, 1982.

TATE, K. R.; SALCEDO, I. H. Phosphorus control of soil organic matter accumulation and cycling. **Biogeochemistry**, v. 5, n. 1, p. 99-107, 1988.

TIESSEN, H.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid Northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 38, n. 3, p. 139-151, 1992.

TIESSEN, J.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V. Pathways of phosphorus transformations in soil of differing pedogenesis. **Soil Science Society of American Journal**, v. 48, n. 1, p. 853-858, 1984.

VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C.; SILVA JÚNIOR, M. L.; COUTINHO, R. M. V. Formas de fósforo em solos do Estado do Pará - I - Latossolo Amarelo da parte Noroeste da Região Bragantina. **Boletim da FCAP**, v. 21, n. 1, p. 65-75, 1993.

VU, D.; TANG, C.; ARMSTRONG, R. D. Changes and availability of P fractions following 65 years of P applicaiotn to a calcareous soil in a Mediteranean climate. **Plant and Soil**, v. 304, v. 1, p. 21-34, 2008.

### **CAPÍTULO 3 – FRACIONAMENTO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS E FORMAS DE NITROGÊNIO INORGÂNICO EM ÁREAS DA AMAZÔNIA OCIDENTAL**

**RESUMO** - Os solos da Amazônia apresentam baixa fertilidade natural em um ecossistema dependente da ciclagem de nutrientes para se manter. Mudanças na cobertura dos solos nesta região podem modificar o teor de matéria orgânica, influenciando as substâncias húmicas e as formas de N no solo, importante variável para se determinar a qualidade do solo. Objetivou-se caracterizar as substâncias húmicas da matéria orgânica e as formas de N inorgânico do solo em áreas de Latossolo Amarelo sob pastagem (PT), cultivo de citrus (CC), Terra Mulata (TM) e Terra Preta de Índio (TPI), com a mata nativa (MN) como referência, na Amazônia Ocidental. Foram retiradas amostras de solo nas cinco áreas, no município de Manacapuru, estado do Amazonas, nas profundidades de 0 - 5, 5 - 10 e 10 - 20 cm. A fração humina correspondeu à maior parte das substâncias húmicas, seguida pelo ácido húmico e ácido fúlvico. Essas frações estiveram concentradas na camada de 0 - 5 cm, com tendência de diminuição em camadas profundas. A TPI apresentou maiores teores de humina, ácido húmico e maior relação AH/AF quando comparada às demais áreas. Já a MN, CC e TM apresentaram os maiores teores de ácido fúlvico e as relações AH/AF mais próximas de 1. A concentração de N total foi maior em área de PT em 0 – 5 cm e TPI na camada de 0 – 5 e 5 – 10 cm. O N inorgânico e  $\text{N-NH}_4^+$  apresentaram maiores teores na MN, PT e CC na camada de 0 – 5 cm, sendo o  $\text{N-NH}_4^+$  correspondente a maior fração de N inorgânico em todas as áreas estudadas. Foram observados maiores teores de  $\text{N-NO}_3^-$  na camada de 0 – 5 cm da MN e menores teores na TM em todas as profundidades. Os resultados de teores de substâncias húmicas mostraram que as transformações da MN em cultivos agrícolas tiveram pouca influência nas áreas de TPI e TM, já a redução dos teores de substâncias húmicas foi observada na PT. Para os teores de N, todas as áreas apresentaram aumento dos teores de N total e redução para as demais frações.

**PALAVRAS-CHAVE:** Carbono orgânico, Cultivos Agrícolas, Solos Amazônicos, Terra Mulata, Terra Preta de Índio

### 3.1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos solos da Amazônia são classificados em Latossolos e Argissolos de baixa fertilidade natural, com característica de solos ácidos, com altos teores de Al, baixa CTC e baixos teores de P (SANCHEZ et al., 1982; CUNHA et al., 2007). A deposição de resíduos orgânicos e sua mineralização tem importância na transformação de componentes húmicos, que estão ligados a nutrição da vegetação e melhorias nas condições de fertilidade do solo (BARRETO et al., 2008).

O modo de abertura das áreas com a retirada das árvores e queima do restante da vegetação para limpeza (MARTINS et al., 1991), interrompe a ciclagem de nutrientes, reduz o estoque de matéria orgânica e diminui a capacidade de reposição dessa no solo (ARAÚJO et al., 2004).

Manchas escuras de solos que ocorrem em toda a extensão da Amazônia são capazes de manter altos níveis de matéria orgânica mesmo após a retirada da floresta. Esses solos são chamados de Terra Preta de Índio (TPI) e são originários da ocupação humana pré-colombiana datada de milhares de anos (LEMOS et al., 2011; MOREIRA, 2007). Nos arredores da TPI, a Terra Mulata (TM) se destaca por ter coloração menos intensa e ocupar maiores extensões com vestígios habitacionais indígenas, porém, apresenta menor fertilidade quando comparada a TPI e maior quando comparada aos demais solos da Amazônia (GLASER et al., 2001; SOMBROEK et al., 2002).

A alta fertilidade dos solos antropogênicos é atribuída à matéria orgânica associada ao biocarvão, oriundo de queima lenta que rendeu a este material resistência à decomposição microbiana, o que garantiu acúmulos de altos teores de matéria orgânica no solo. A sua composição é considerada estável pela própria composição do material e a estabilização com complexos organominerais, também pela alta reatividade das substâncias húmicas (SH) (KERN; COSTA, 1997; SOMBROEK et al., 2002).

As SH, compostas por humina (HU), ácidos fúlvicos (AF) e ácidos húmicos (AH), são a parte final da evolução da matéria orgânica com contribuição aproximada de 70% do C do solo. A diferenciação entre as partes se dá pelos grupos funcionais (fenólicos, carboxílicos, entre outros grupos) e o grau de polimerização

(STEVENSON, 1994). Cada fração está intimamente ligada à qualidade do húmus do solo em diferentes proporções.

O N tem grande parte de sua disponibilidade em solos tropicais originada da matéria orgânica do solo, que após a mineralização é convertido em forma assimilável pelas plantas (BOEIRA; LIGO; DYNIA, 2002). Com a retirada da vegetação e diminuição da matéria orgânica, o suprimento de N no solo para absorção de plantas pode ser comprometido, já que cerca de 98% do N é encontrado na forma orgânica, e a outra pequena parte na forma inorgânica, principalmente  $\text{N-NH}_4^+$  e  $\text{N-NO}_3^-$  (COSER et al., 2007).

Matoso et al. (2012), estudando solos amazônicos sob diferentes usos e com a mata nativa como referência, observaram que a maior parte do N total da mata nativa foi reduzida quando em uso de cultivo agrícola, principalmente no sistema convencional de preparo de solo e pastagem, atribuindo tal resultado ao isso ao manejo inadequado do solo para manutenção de matéria orgânica. Já Neill et al. (1997) relatam a diminuição drásticas de todas as frações de N na transformação da mata nativa para a pastagem na região de Rondônia.

De maneira geral, a transformação da floresta em cultivo agrícola diminui a quantidade de matéria orgânica no solo e agrava a baixa fertilidade natural dos solos da Amazônia. Com isso, os agricultores da região têm buscado áreas com horizonte A antrópico para o cultivo agrícola, conhecidas pela alta fertilidade. Essas áreas são utilizadas de forma intensiva e sem o uso de fertilizantes e corretivos. Contudo, é pouco conhecida cientificamente a capacidade de manutenção da fertilidade dessas áreas com o cultivo agrícola ao longo do tempo, principalmente quando o que se deseja é avaliar a qualidade do solo.

Objetivou-se com esse estudo caracterizar as substâncias húmicas da matéria orgânica e as formas de N inorgânico do solo em áreas de Latossolo Amarelo sob pastagem, cultivo, Terra Mulata e Terra Preta de Índio, tendo-se a mata nativa como referência, na Amazônia Ocidental.

### **3.2 MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi realizado em propriedades rurais localizadas próximas ao ramal da Costa do Laranjal, entre os quilômetros 10 e 29, no sentido Rio Solimões, distante

84 km de Manaus, em área do município de Manacapuru, estado do Amazonas, localizado nas coordenadas geográficas 3°18'33"S e 60°33'21"W, a 34 metros de altitude. Segundo a classificação de Köppen, a área integra o quadro macroclimático do tipo AmW tropical chuvoso e úmido, com umidade em torno de 85%, temperatura máxima de 31 °C, mínima de 23 °C e média de 26 °C, e precipitação próxima de 2.250 mm anuais.

As áreas estão em uso por pequenos agricultores, próximas umas das outras (raio de aproximadamente 5 km), em relevo plano com predomínio de Latossolo Amarelo distroférico - LAdf (Embrapa, 2013), as quais foram desmatadas em 1980 para a extração de madeiras de uso comercial; o restante da vegetação foi derrubado, sendo utilizado fogo para a limpeza da área, antes do estabelecimento dos cultivos agrícolas.

As áreas utilizadas foram: (MN) mata nativa da floresta Amazônica preservada, com cobertura vegetal primária e com porte variado de espécies, bem drenada, com rica camada de serapilheira em superfície; (TPI) LAdf com horizonte A antrópico, Terra Preta de Índio, desmatada há 35 anos e com cultivo atual de laranja Pêra (seis anos de idade) plantada no espaçamento de 6 x 5 m. Após a abertura da área, a mesma sempre foi cultivada com citrus, com a substituição de plantas velhas por novas na mesma cova, sem calagem e adubação ou movimentação do solo. Os tratos culturais restringiram-se a dessecação de plantas daninhas nas entrelinhas; (TM) LAdf com horizonte A antrópico, Terra Mulata, com mesmo histórico e descrição da TPI; (CC) LAdf sob cultivo de laranja Pêra (plantas com diferentes idades) em áreas com 35 anos após a derrubada da mata. Essa área recebe a aplicação de calcário e adubo mineral na projeção da copa somente uma vez durante todo o plantio, sendo evitada a coleta de solo próxima do local onde foi recebido adubação. Como na TPI e na TM não há preparo ou movimentação do solo, sendo as plantas submetidas também, aos mesmos tratos culturais; (PT) pastagem de *Urochloa brizantha* com 6 anos, formada após a derrubada da floresta. Anualmente é realizada queima com fogo para a renovação do pasto. Não há aplicação de calcário e adubo, ou revolvimento do solo. A área apresentava sinais de degradação do solo.

Os dados foram analisados segundo o delineamento experimental inteiramente casualizado com parcelas subdivididas (áreas x profundidade, tratamento principal e

tratamento secundário, respectivamente), com três repetições. As amostras dos solos nas áreas de TPI, TM e CC foram coletadas no centro das entrelinhas das plantas de citrus. A amostragem foi realizada com trado holandês e em três profundidades, de 0 a 5, 5 a 10 e 10 a 20 cm. As áreas foram divididas em três unidades experimentais, cada uma delas com aproximadamente 400 m<sup>2</sup>, sendo retiradas 15 subamostras em cada parte para a formação da amostra composta para cada profundidade. Ao final da coleta, as amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira com abertura de malha de 2,0 mm e armazenadas.

As amostras de solos tiveram seus atributos químicos e físicos determinados seguindo os métodos de Raij et al. (2001) para pH em CaCl<sub>2</sub> (1:2,5), Ca, Mg, K, alumínio trocável (Al), P resina e acidez potencial (H + Al). A análise de granulometria do solo foi realizada pelo método pipeta (EMBRAPA, 2011). A CTC potencial foi calculada, somando-se os teores de K, Ca, Mg e H + Al. O carbono orgânico (CO) pelo determinado método de Walkey-Black (NELSON; SOMMERS, 1996), e o carbono orgânico total (COT) foi determinado por combustão a seco em analisador elementar LECO CN628 (Tabela 1).

O fracionamento químico das substâncias húmicas foi realizado no Laboratório de Solos e Água da Universidade da Flórida seguindo o método proposto pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas – IHSS (SWIFT, 1996), com modificações feitas por Benites, Madari e Machado (2003), obtendo-se ao final as frações de carbono em ácido húmico, ácido fúlvico e humina.

Foi pesado para cada amostra a alíquota de solo correspondendo a 30 mg de carbono orgânico em tubo de centrífuga que recebeu 20 mL de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> sendo posteriormente agitada manualmente e deixada em repouso por 24 horas. A etapa seguinte foi a centrifugação a 5.000 g por 30 minutos e após o recolhimento do sobrenadante, que foi armazenado em copo plástico, o restante da amostra recebeu mais 20 mL de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, foi agitado até a suspensão do precipitado e ficou em repouso por mais 1 hora. Novamente foi centrifugado 5.000 g por 30 minutos e o sobrenadante foi adicionado ao sobrenadante anterior. O pH foi ajustado para 1,0 adicionando-se H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 20% e deixado em repouso por mais 18 horas. O sobrenadante acidificado foi filtrado e separado para titulação do ácido fúlvico, e o precipitado presente no filtro foi lavado com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> até a limpeza total do mesmo como

material destinado a titulação de ácido húmico. Ambos, o sobrenadante e o precipitado, foram aferidos para 50 ml com água destilada. O solo restante no tubo de centrífuga foi seco em estufa a 65 °C e com este material foi feita a titulação de humina. As determinações do carbono das três frações foram feitas com a oxidação de dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$  0,1667 mol L<sup>-1</sup>) e titulação do excesso com sulfato ferroso amoniacal (0,25 mol L<sup>-1</sup> para HU e 0,0125 mol L<sup>-1</sup> para AF e HU). Dos teores de cada fração de substância húmica foi calculada a relação AH/AF e os valores representativos em porcentagem. Vale destacar que o resultado de cada fração é operacionalmente definido em frações de C em AF, AH e HU.

**Tabela 1.** Caracterização química e granulométrica das áreas nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

| Áreas      | pH<br>(CaCl <sub>2</sub> ) | Ca <sup>2+</sup><br>----- | Mg <sup>2+</sup><br>----- | K <sup>+</sup><br>mmolc | Al <sup>3+</sup><br>dm <sup>-3</sup> | H + Al<br>----- | CTC<br>----- | P<br>mg dm <sup>-3</sup> | CO<br>----- | COT<br>g kg <sup>-1</sup> | Areia<br>----- | Argila<br>----- |
|------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------|--------------------------|-------------|---------------------------|----------------|-----------------|
| 0 - 5 cm   |                            |                           |                           |                         |                                      |                 |              |                          |             |                           |                |                 |
| TPI        | 6,3                        | 154                       | 25                        | 1,6                     | 0                                    | 22              | 201          | 344                      | 35          | 43                        | 573            | 190             |
| PT         | 3,6                        | 2                         | 1                         | 0,4                     | 20                                   | 135             | 138          | 10                       | 29          | 36                        | 583            | 220             |
| MN         | 4,5                        | 33                        | 5                         | 0,9                     | 5                                    | 80              | 119          | 74                       | 24          | 32                        | 445            | 190             |
| TM         | 4,3                        | 26                        | 7                         | 0,7                     | 12                                   | 98              | 132          | 44                       | 26          | 38                        | 578            | 180             |
| CC         | 3,8                        | 7                         | 2                         | 1,2                     | 43                                   | 166             | 176          | 12                       | 30          | 38                        | 648            | 170             |
| 5 - 10 cm  |                            |                           |                           |                         |                                      |                 |              |                          |             |                           |                |                 |
| TPI        | 6,3                        | 142                       | 23                        | 1,6                     | 0                                    | 22              | 191          | 320                      | 33          | 36                        | 560            | 180             |
| PT         | 3,7                        | 2                         | 1                         | 0,3                     | 20                                   | 98              | 101          | 8                        | 16          | 22                        | 532            | 190             |
| MN         | 4,4                        | 28                        | 3                         | 0,5                     | 7                                    | 72              | 104          | 63                       | 19          | 27                        | 577            | 210             |
| TM         | 4,0                        | 12                        | 3                         | 0,6                     | 21                                   | 135             | 151          | 23                       | 23          | 32                        | 515            | 200             |
| CC         | 3,7                        | 3                         | 2                         | 0,6                     | 44                                   | 166             | 172          | 10                       | 27          | 33                        | 631            | 200             |
| 10 - 20 cm |                            |                           |                           |                         |                                      |                 |              |                          |             |                           |                |                 |
| TPI        | 5,9                        | 111                       | 16                        | 1,1                     | 0                                    | 38              | 166          | 316                      | 24          | 33                        | 611            | 200             |
| PT         | 3,8                        | 2                         | 1                         | 0,3                     | 18                                   | 88              | 91           | 6                        | 14          | 21                        | 512            | 220             |
| MN         | 4,3                        | 19                        | 2                         | 0,4                     | 9                                    | 80              | 101          | 28                       | 16          | 23                        | 548            | 240             |
| TM         | 3,8                        | 4                         | 2                         | 0,5                     | 27                                   | 135             | 142          | 10                       | 19          | 26                        | 579            | 190             |
| CC         | 3,7                        | 2                         | 1                         | 0,5                     | 46                                   | 166             | 170          | 7                        | 21          | 25                        | 637            | 190             |

Ca: cálcio; Mg: magnésio; K: potássio; P: fósforo; Al: alumínio trocável; H+Al: acidez potencial; CTC: capacidade de troca de cátions; CO: carbono orgânico; COT: carbono orgânico total; TPI: Terra Preta de Índio; TM: Terra Mulata; MN: mata nativa; CC: Cultura de citrus; e PT: Pastagem.

O N total foi determinado na TFSA pelo método de Kjeldahl. Para determinar os teores de N-amoniacoal (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e N-nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) nas amostras de solo,

empregou-se o método proposto por Bremner e Keeney (1965), pesando-se 2,5 g de solo da amostra em tubo de centrífuga de 50 mL e adicionado 25 mL de solução de KCl 2 mol L<sup>-1</sup>. Após, o tubo foi agitado por 1 hora a 145 rpm e centrifugado a 3.000 rpm por 3 minutos. O material foi filtrado e a leitura de N-inorgânico e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> foi realizada no Timberline N Analyzer TL2X200, sendo o N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> obtido pela diferença dessas duas leituras.

Os dados foram avaliados por meio de análise de variância (ANOVA). Quando os resultados foram significativos, aplicou-se o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) para comparação entre as médias.

### 3.3 RESULTADOS

As frações húmicas apresentaram diferença significativa nas áreas e profundidades do solo (Tabela 2).

**Tabela 2.** Distribuição de humina (HU), ácido húmico (AH) e ácido fúlvico (AF) e a relação (AH/AF) em áreas da Amazônia Ocidental.

| Prof.<br>(cm)                                            | TPI      | TM      | MN      | CC       | PT      |
|----------------------------------------------------------|----------|---------|---------|----------|---------|
| ----- Humina (mg de C g <sup>-1</sup> solo) -----        |          |         |         |          |         |
| 0-5                                                      | 21,3 aA  | 18,0 bB | 20,7 aA | 16,6 cB  | 13,1 dA |
| 5-10                                                     | 20,0 aB  | 16,4 cC | 18,2 bB | 19,5 aA  | 9,2 dB  |
| 10-20                                                    | 20,8 aAB | 19,2 bA | 16,2 cC | 19,1 bA  | 5,8 dC  |
| ----- Ácido húmico (mg de C g <sup>-1</sup> solo) -----  |          |         |         |          |         |
| 0-5                                                      | 13,7 bB  | 18,7 aA | 11,8 cA | 12,4 bcA | 6,7 dA  |
| 5-10                                                     | 15,8 aA  | 14,4 aB | 9,7 bB  | 9,9 bB   | 5,3 cB  |
| 10-20                                                    | 16,4 aA  | 11,7 bC | 4,6 dC  | 6,4 cC   | 2,5 eC  |
| ----- Ácido fúlvico (mg de C g <sup>-1</sup> solo) ----- |          |         |         |          |         |
| 0-5                                                      | 5,5 cA   | 9,8 abB | 10,2 aA | 8,8 bA   | 5,8 cA  |
| 5-10                                                     | 5,6 cA   | 11,9 aA | 8,7 bB  | 8,6 bA   | 4,1 dB  |
| 10-20                                                    | 4,5 dB   | 11,6 aA | 8,3 bB  | 5,6 cB   | 1,3 eC  |
| ----- AH/AF -----                                        |          |         |         |          |         |
| 0-5                                                      | 2,7 aB   | 1,9 abA | 1,2 cA  | 1,4 bcA  | 1,2 bcB |
| 5-10                                                     | 2,8 aB   | 1,2 bB  | 1,1 bA  | 1,2 bA   | 1,3 bB  |
| 10-20                                                    | 3,7 aA   | 1,0 cB  | 0,5 cA  | 1,1 cA   | 2,2 bA  |

\*Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). TPI: Terra Preta de Índio; TM: Terra Mulata; MN: Mata nativa; CC: Cultivo de citrus; PT: Pastagem.

A fração HU foi a SH mais abundante entre as áreas estudadas. A TPI apresentou a maior concentração de HU nas profundidades de 0 – 5, 5 – 10 e 10 – 20 cm, seguida da camada de 0 - 5 cm da área da MN e da camada de 5 - 10 cm da área de CC, mostrando que mesmo após a transformação em área de cultivo a matéria orgânica manteve teores próximos ao da floresta. Já os menores valores foram reportados em todas as profundidades da área de PT, sendo a área que mais sofreu alteração após a abertura de área de floresta em teores de HU.

Para AH, os maiores valores médios significativos foram encontrados na camada de 0 - 5 cm, e somente a área de TPI apresentou maiores concentrações em camadas mais profundas, 5 - 10 e 10 - 20 cm. A área de TM na profundidade 0 - 5 e 5 - 10 cm e a TPI na profundidade de 5 - 10 e 10 - 20 cm, diferiram estatisticamente com maiores médias. Por outro lado, as médias da PT foram menores em todas as profundidades avaliadas quando comparadas as demais áreas.

Observaram-se os maiores teores de AF entre as camadas de 0 - 5 cm da MN e PT, 5 - 10 e 10 – 20 cm em CC e TPI e 0 - 5 e 5 - 10 cm na TM. Quando analisado entre as áreas, TM apresentou as maiores médias seguido da MN, e o PT a menor. Houve tendência de decréscimo nas profundidades dos solos em todas as áreas avaliadas, sendo somente em área de TM o teor aumentou nas camadas mais profundas.

A relação AH/AF variou de modo significativo, sendo que a TPI apresentou as maiores médias em relação às demais, e MN as menores médias. Entre as profundidades as áreas de MN e CC não apresentaram diferença, porém PT e TPI apresentaram maiores médias na profundidade de 10 -20 cm, diferenciando de TM que apresentou na camada de 0 - 5 cm.

A HU correspondeu a maior parte das SH e o AF menor quando apresentado em porcentagens (Figura 1).

A fração HU foi predominante em todas as áreas e camadas com variações entre 34 a 61%, com exceção na área de TM na camada de 0 - 5 cm e TPI na camada de 10 - 20 cm. Os teores de HU apresentaram tendência de aumento em porcentagem em maiores profundidades do solo nas áreas de MN, PT, CC e TM, e na TPI a tendência foi de decréscimo. Após a fração HU, o AH foi a fração mais presente nas áreas e profundidades com valor mínimo de 16% e valor máximo de 52%, excetuando-

se somente a área de MN na camada de 10 - 20 cm, sendo esta a menor fração. O menor teor de SH representado nessas áreas foi a de AF, com proporção que variou de 13 a 28%.

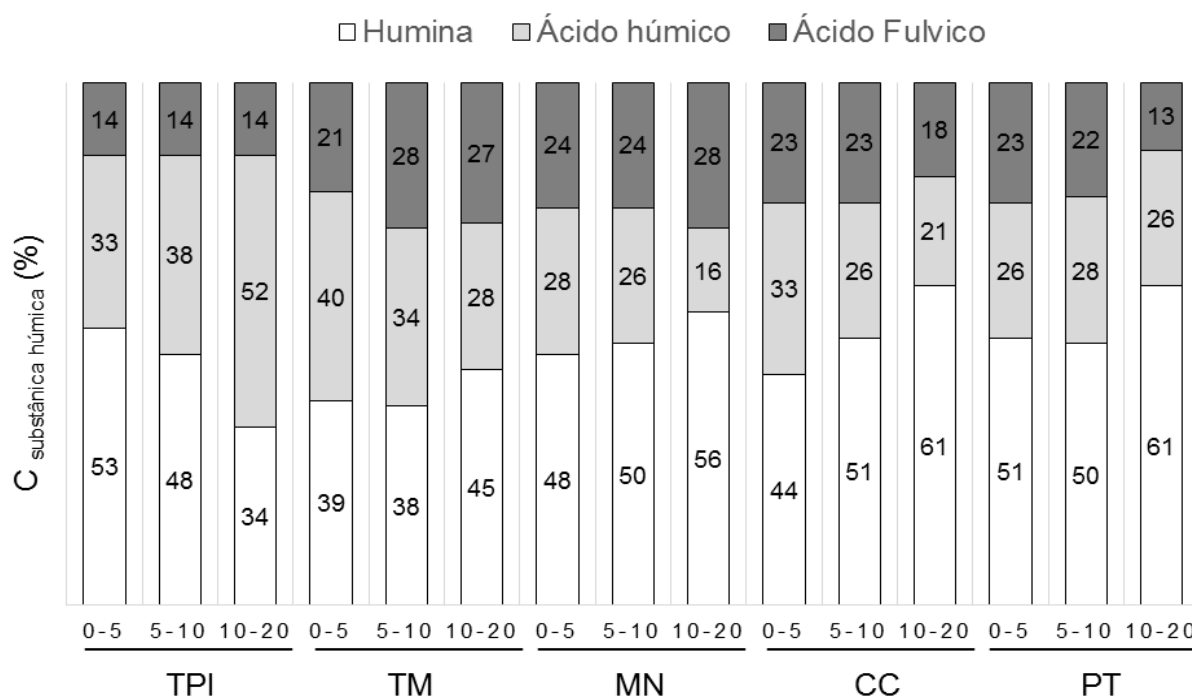


**Figura 1.** Distribuição percentual de carbono de substâncias húmicas (humina, ácido húmico e ácido fúlvico) em solos da Amazônia Ocidental. TPI: Terra Preta de Índio; TM: Terra Mulata; MN: mata nativa; CC: cultivo de citrus; e PT: pastagem.

Os teores das diferentes formas de N diferiram significativamente entre as profundidades do solo e áreas (Tabela 3).

As médias de N total apresentaram comportamento semelhante com maiores médias na camada de 0 - 5 cm em todas as áreas, incluindo a profundidade de 5 - 10 cm das áreas de TM e TPI. Já as menores médias foram encontradas nas áreas de MN e CC na camada de 10 - 20 cm. Houve o decréscimo de teores de N total nas profundidades de todas as áreas.

As médias para teores de N inorgânico apresentaram diferença significativa com a maior média na área de MN na camada de 0 - 5 cm e a menor na CC na camada de 10 - 20 cm. Verifica-se a maior concentração de N inorgânico na camada de 0 - 5

cm em todas as áreas, juntamente com a profundidade de 5 - 10 cm nas áreas de TM e TPI.

**Tabela 3.** Distribuição das formas de N inorgânico em em áreas da Amazônia Ocidental.

| Prof.<br>(cm)                                                     | TPI      | TM      | MN       | CC      | PT      |
|-------------------------------------------------------------------|----------|---------|----------|---------|---------|
| ----- N-Total (g kg <sup>-1</sup> ) -----                         |          |         |          |         |         |
| 0-5                                                               | 2,5 aA   | 1,9 bA  | 1,5 cA   | 2,0 bA  | 2,7 aA  |
| 5-10                                                              | 2,4 aA   | 1,8 bA  | 1,1 cB   | 1,6 bB  | 2,3 aB  |
| 10-20                                                             | 1,8 abB  | 1,6 bcB | 1,2 dB   | 1,4 cC  | 2,0 aC  |
| ----- N inorgânico (mg kg <sup>-1</sup> ) -----                   |          |         |          |         |         |
| 0-5                                                               | 12,3 dA  | 10,4 dA | 49,4 aA  | 20,6 bA | 16,2 cA |
| 5-10                                                              | 12,1 abA | 10,6 bA | 12,0 abC | 12,8 aB | 14,2 aB |
| 10-20                                                             | 8,4 cB   | 8,9 cA  | 22,5 aB  | 9,8 cC  | 13,8 bB |
| ----- N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg kg <sup>-1</sup> ) ----- |          |         |          |         |         |
| 0-5                                                               | 6,7 dAB  | 9,8 cAB | 36,5 aA  | 15,2 bA | 15,6 bA |
| 5-10                                                              | 7,8 cA   | 9,9 bA  | 10,5 bC  | 10,3 bB | 13,0 aB |
| 10-20                                                             | 5,9 dB   | 8,5 cB  | 15,6 aB  | 7,8 cC  | 10,8 bC |
| ----- N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg kg <sup>-1</sup> ) ----- |          |         |          |         |         |
| 0-5                                                               | 5,6 bA   | 0,6 cA  | 12,9 aA  | 5,3 bA  | 0,6 cB  |
| 5-10                                                              | 4,4 aB   | 0,6 cA  | 1,5 cC   | 2,6 bB  | 1,2 cB  |
| 10-20                                                             | 2,5 bcC  | 0,4 dA  | 6,8 aB   | 2,0 cB  | 3,1 bA  |

\*Médias seguidas de mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). TPI: Terra Preta de Índio; TM: Terra Mulata; MN: Mata nativa; CC: Cultivo de citrus; PT: Pastagem.

Para N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a área de MN na camada de 0 - 5 cm diferiu estatisticamente das demais áreas e profundidades, apresentando a maior média. Já a menor média foi registrada no tratamento CC em 10 - 20 cm. De maneira geral, o N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> está concentrado na camada de 0 - 5 cm e decresce em maiores profundidades das áreas.

Em relação ao N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, a camada de 0 - 5 cm na área de MN diferiu estatisticamente com maior média em relação às demais áreas, apresentando a TM as menores médias em todas as profundidades avaliadas. A concentração de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no perfil do solo está principalmente concentrada na camada de 0 - 5 cm, com exceção do PT onde a maior média foi encontrada na profundidade de 10 - 20 cm.

O N inorgânico representou uma pequena parte do N total (Figura 2 a) e a maior parte do N inorgânico distribuído em porcentagem foi encontrado na forma de  $\text{N-NH}_4^+$  nas áreas e profundidades estudadas (Figura 2 b).

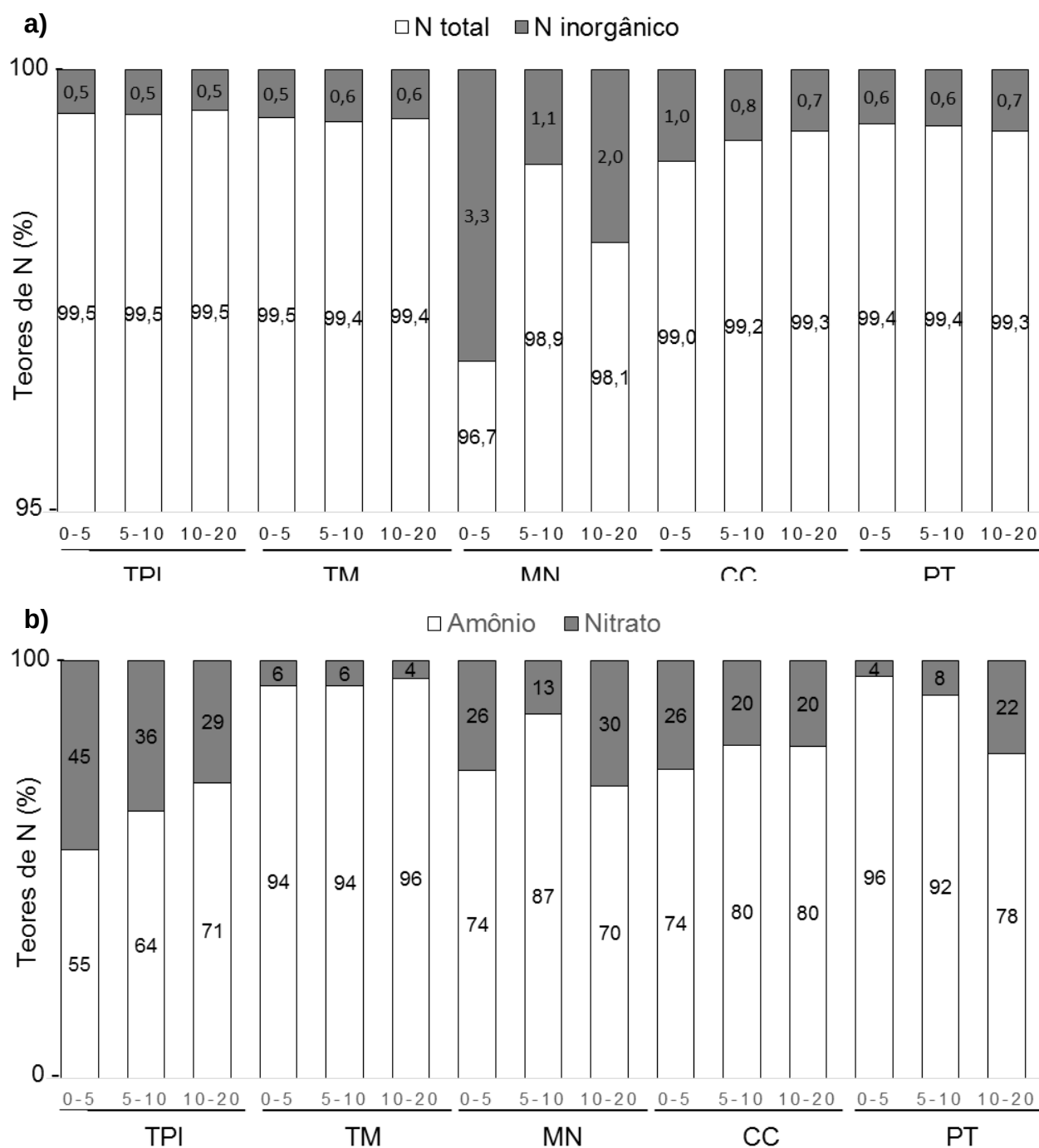


**Figura 2. a)** Porcentagem de distribuição do N inorgânico em relação ao N total e **b)** N inorgânico (Amônio e Nitrato) em solos da Amazônia Ocidental. TPI: Terra Preta de Índio; TM: Terra Mulata; MN: mata nativa; CC: cultivo de citrus; e PT: pastagem.

O N total está dividido em sua menor parte na fração inorgânica no solo chegando a variação de 96,71 a 99,54% deduzida a representar a fração orgânica. A fração inorgânica foi proporcionalmente menor nas áreas e profundidades estudadas, porém na camada de 0 - 5 cm da área de MN a representação de 3,3% é alta, quando comparado as demais áreas.

A maior proporção N inorgânico nos usos de solos estudados estão concentrados na forma de  $\text{N-NH}_4^+$ , correspondendo até 96,24%, como na camada de 0 - 5 em PT, e com o mínimo de 54,63% na camada de 0 - 5 em TPI.

### 3.4 DISCUSSÃO

A fração HU, tanto em Latossolo com horizonte A antrópico ou não, foi a SH mais presente nas áreas estudadas, podendo-se relacionar essa a forte ligação com os coloides do solo, diminuindo a lixiviação e mantendo estabilizada na camada do solo (CANELLAS et al., 2000). Concomitantemente, a deposição de matéria orgânica na camada superficial de 0 - 5 cm possui maior atividade da biomassa microbiana para degradação, o que garantiu a maior concentração de HU nessa camada e o seu decréscimo em profundidade.

Em áreas que recebem maior quantidade de resíduos orgânicos, como MN, o teor de HU tende a ser maior. Porém, as áreas de CC e TM apresentaram efeito contrário, com maiores teores nas camadas mais profundas. Isso pode ter ocorrido pelo aumento de matéria orgânica oriunda de raízes da cultura de laranja e baixa taxa de deposição de matéria orgânica, quando comparada a área de MN, tendendo a diminuição ao decorrer do tempo após a transformação da área em cultivo agrícola pela diminuição de C na camada superficial. Já a TPI apresentou uniformidade de teor de HU no perfil do solo analisado. Nota-se que, possivelmente, houve a resistência à degradação proporcionada pelo biocarvão juntamente com a matéria orgânica encontrado nesse tipo de área, permitindo maior acúmulo de HU e reserva de C orgânico no solo (EBELING et al., 2011), mostrando que a abertura da área de TPI para cultivo agrícola possuiu menor efeito nos teores de matéria orgânica.

A fração HU foi também predominante no estudo realizado por Loss et al. (2007). Os autores citam que adoção de práticas que mantém a matéria orgânica criam condições físicas e químicas no solo favoráveis a maior fração. Barros et al.

(2012) estudaram o fracionamento químico de SH em solos de TPI encontraram o C em HU na proporção de 43 a 59%, resultados semelhantes aos encontrados no presente trabalho. Resultados similares foram descritos por Cunha et al. (2009), sendo que a concentração de HU correspondeu de 43 a 45% da fração total de C orgânico. No mesmo trabalho, as SH em solos com e sem horizonte A antrópico, a média de HU foi de 49%, concluindo que valores de HU menores que 45%, indicam a presença de húmus pouco evoluído, de fraca humificação, exemplificando ambientes com baixa limitação a atividade microbiana, fator esse que diminui os impactos negativos da transformação de áreas de solos antropogênicos em cultivos agrícolas, mantendo similaridade com as áreas de floresta no teor de SH.

Depois da HU, a fração de SH mais encontrada nos solos estudados foi o AH, semelhante ao estudo realizado por Lima et al. (2006). Por sua característica de solubilidade em ambiente alcalino, podem ser encontradas as maiores frações em solos com horizonte A antrópico em relação aos solos não antrópicos. Esta fração ajuda a explicar parte da fertilidade dos solos antropogênicos, devido essa fração elevar a CTC do solo e retenção de bases, além de ser mais estável no solo. Cunha et al. (2009) encontraram teores de 19 a 31% de AH estudando solos amazônicos com horizonte A antrópico ou não, e concluiu que este resultado pode ser devido à intensa humificação e pela rápida mineralização de grandes quantidades de material orgânico rico em N, P e Ca incorporado ao solo. Para Barros et al. (2012) em estudo com TPI, o AH tende a ser alto nesse solo devido aos altos níveis de cátions bases presentes nessas áreas.

Entre as SH estudadas, o AF foi encontrado em menor teor. Esses possuem maior capacidade de formar complexos argilo-húmicos, que torna esses ácidos mais estáveis que os AH (MENDONÇA; ROWELL, 1996), característicos em solos que estão em processo de degradação e perda de fertilidade. Porém, o AF é considerado mais solúvel e móvel, em se tratando da região amazônica com alta pluviosidade, pode gerar em perdas consideráveis pelo perfil do solo, principalmente em áreas com menor teor de matéria orgânica, fato claramente observado em área de PT que apresentou menores médias, e a MN com as maiores médias concentradas nas camadas superficiais do solo.

Cunha et al. (2009) encontraram valores de AF variando de 11 a 16% em solos com horizonte A antrópico ou não, maior intervalo foi encontrado no estudo realizado por Novotny et al. (2007) com mínimo de 16% e máximo de 46%. Já Madari et al. (2009) encontraram valores de AF em TPI na camada de 0 - 5 cm em ordem de 53%.

Para avaliar o grau de humificação da matéria orgânica a relação AH/AF é um indicador da qualidade do húmus (KONONOVA, 1982) expressando o grau de evolução do processo de humificação da matéria orgânica. Para este experimento, em sua grande maioria, a relação foi maior que 1, indicando as condições do solo e clima favorecem a polimerização e condensação da matéria orgânica, em outras palavras, nos solos com relação maior que 1 é possível se acumular matéria orgânica nesse solo (BENITES, MADARI e MACHADO, 2003).

A TPI apresentou as maiores relações entre as áreas em todas as profundidades, e isso mostra a capacidade do biocarvão em reter a matéria orgânica degradada, reduzindo perdas de C no ambiente. As relações se mostraram mais equilibradas e de melhor qualidade do solo, mesmo em condições favoráveis à rápida mineralização da matéria orgânica, próximas de 1, nas camadas superficiais das áreas, principalmente na MN que decresceu consideravelmente em perfis mais profundos apresentando relações menores que 1, o que indica perda de AF pela sua mobilidade e desfavorecimento da síntese, acumulação da fração mais estável, restrições edáficas e ao baixo conteúdo de bases trocáveis e alta taxa de mineralização (CANELLAS et al., 2002; BONIFÁCIO et al., 2006), fato comum em solos tropicais. Esse baixo conteúdo de bases trocáveis dificulta a atividade microbiana e resulta na redução do processo de humificação (DABIN, 1981).

Lima et al. (2002) encontraram maiores frações de AH e HU em solos com horizonte A antrópico na Amazônia brasileira, onde as relações foram de AH/AF de 14 em um solo não antropogênico, muito superior ao encontrado neste experimento. Já Cunha et al. (2009) encontraram relação semelhante em TPI de 2,8. Barros et al. (2012) encontraram relações para áreas de solos com horizonte A antrópico de 1,59 a 1,84 considerando ideal para este tipo de área. Já os valores de AH/AF os valores variaram entre 0,02 e 6,55 quando Santos, Lacerda e Zinn (2013) estudaram diferentes solos das regiões brasileiras.

Os teores de N total foram maiores nas camadas iniciais em todas as áreas, principalmente na camada de 0 - 5 cm. Isso se deve a deposição de materiais orgânicos advindo da floresta e das culturas na camada superior e com assim todo o processo de decomposição microbiana e liberação do N está concentrado nessa camada. As áreas de TPI e PT apresentaram os maiores teores quando comparadas as demais, registra-se para a primeira área o efeito do biocarvão dessa área na retenção e adsorção do N disponível (LEHMANN et al., 2003), assim diminuindo perdas e aumentando os teores de N total no solo. Já para a segunda área, acredita-se que o teor de N total foi alto provavelmente por substratos orgânicos de decomposição lenta com alta lignina, o que contribuiria para o estoque de N no solo (PULRONIK et al., 2009).

A área de MN apresentou o maior teor de N inorgânico,  $\text{N-NH}_4^+$  e  $\text{N-NO}_3^-$  na camada de 0 - 5 cm de profundidade, isto possivelmente aconteceu devido a maior deposição da matéria orgânica nas camadas superficiais, sendo acelerado o processo de decomposição microbiana, que mineraliza rapidamente, deixando essas formas de N rapidamente disponível no solo. Comportamento oposto pode ser visto nas áreas de TM e TPI para N inorgânico e  $\text{N-NH}_4^+$ , que de maneira geral apresentaram menores médias, podendo se relacionar a resistência a degradação microbiana proporcionada pelo biocarvão por diminuir os teores dessas frações, fato que dificulta a mineralização do N (ALFAIA, 1997). Já para o  $\text{N-NO}_3^-$ , os menores teores encontrados em área de TM e PT, justificado na primeira área possivelmente o excesso de cargas negativas no solo, o que aumenta a lixiviação do  $\text{N-NO}_3^-$ , e para a segunda área a forma amoniacal é favorecida pelas raízes das gramíneas, que inibem a nitrificação (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002).

Andréa et al. (2004) estudaram o comportamento das formas de N no solo e obtiveram resultados semelhante a esse trabalho ao avaliarem os teores das formas amoniacal e nítrica do solo em Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de manejo, verificando que os maiores teores de  $\text{N-NO}_3^-$  e  $\text{N-NH}_4^+$  localizaram-se na camada superficial do solo (0 - 10 cm) e foram decrescendo ao longo do perfil.

### 3.5 CONCLUSÃO

Com base nos teores de substâncias húmicas e formas inorgânicas de N, a área de TPI apresentou menor transformação pela utilização em cultivo agrícola ao longo do tempo, apresentando médias iguais ou superiores, que caracterizam um solo de boa qualidade quando comparado a MN, sendo a área de PT a que mais caracterizou o efeito da retirada da floresta e decréscimo da qualidade do solo.

### 3.6 REFERÊNCIAS

ALFAIA, S. S. Mineralização do nitrogênio incorporado como material vegetal em três solos da Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 3, p. 387-392, 1997.

ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; GUILHERME, L. R. G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 179-186, 2004.

ARAÚJO, E. A.; LANI, J. L.; AMARAL, E. F.; GUERRA, A. Uso da terra e propriedades físicas e químicas de Argissolo amarelo distrófico na Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 307-315, 2004.

BARRETO, A. C.; FREIRE, M. B. G. S.; NACIF, P. G. S.; ARAÚJO, Q. R.; FREIRE, F. J.; INÁCIO, E. S. B. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1471-1478, 2008.

BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V.; CANELLAS, L. P.; KERN, D. C. Fracionamento químico da matéria orgânica e caracterização física de Terra Preta de Índio. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 55, n. 1, p. 44-51, 2012.

BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixa custo. **Comunicado técnico 16**, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 7pp. 2003.

BOEIRA, R. C.; LIGO, M. A.; DYNIA, J. F. Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com logos de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 11, p. 1639-1647, 2002.

BONIFACIO, E.; SANTONI, S.; CELI, L.; ZANINI, E. Spodosol - Histosol evolution in the Krkonos National Park (CZ). **Geoderma**, v. 131, n. 1, p. 237-250, 2006.

BREMNER, J. M.; KEENEY, D. R. Steam-distillation methods for determination ammonium, nitrate and nitrite. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 1572.

CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; RUMJANEK, V. M.; GURIDI, F.; OLIVARES, F. L.; SANTOS, G. A.; BRAZ-FILHO, R. Distribution of the humified fractions and characteristics of the humic acids of an Ultisol under cultivation of Eucalyptus and sugar cane. **Terra**, v. 20, n. 2, p.371-381. 2002.

CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A.; RUMJANEK, V. M.; MORAES, A. A.; GURIDI, F. Avaliação de características de ácidos húmicos de resíduos sólidos urbanos I. Métodos espectroscópicos (IV, UV e RMN  $^{13}\text{C}$ ) e microscopia eletrônica de varredura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 741-750, 2000.

COSER, T. R.; RAMOS, M. L. G.; AMABILE, R. F.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q. Nitrogênio da biomassa microbiana em solo de Cerrado com aplicação de fertilizante nitrogenado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 3, p. 399-406, 2007.

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; CANELLAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. O.; TROMPOWSKY, P. M.; SANTOS, G. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte a antrópico da Amazônia (Terra Preta). **Acta amazonica**, v. 37, n. 1, p. 91-98, 2007.

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; CANELLAS, L. P.; RIBEIRO, L. P.; BENITES, V. M.; SANTOS, G. A. Soil organic matter and fertility of Anthropogenic Dark Earts (Terra Preta de Índio) in the Brazilian Amazon basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 85-93, 2009.

DABIN, B. Les matières organiques dans les sols tropicaux normalement drainés. **Journée Georges Aubert**, v. 28, n. 1, p.197-215, 1981.

EBELING, A. G.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; PINHEIRO, E. F. M.; VALLADARES, G. S. Substâncias húmicas e relação com atributos edáficos. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 157-165, 2011.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. p. 230.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. p. 342.

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The Terra Preta phenomenon – a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, n. 1, p. 37-41, 2001.

KERN, D. C.; COSTA, M. L. Composição química de solos antrópicos desenvolvidos em Latossolo Amarelo derivados de lateritos. **Geociências**, v. 16, n. 1, p. 141-156, 1997.

KONONOVA, M. M. **Materia orgánica del suelo: su naturaleza, propiedades y métodos de investigación**. Barcelona: Oikos-tau, 1982. p. 364.

LEHMANN, J.; SILVA JÚNIOR, J. P.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant Soil**, v. 249, n. 1, p. 343-356, 2003.

LEMOS, V. P.; MEIRELES, A. R. O.; FERNANDES, K. G.; MORAES, M. C.; COSTA, M. L.; SILVA, A. K. T.; KERN, D. C. Nutrients in a Amazonian Black Earth from Cauxianã Region. **Journal Brazilian Chemical Society**, v. 22, n. 4, p. 772-779, 2011.

LIMA, H. N.; MELLO, J. W. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; LIMA, A. M. N. Mineralogia e química de três solos de uma topossequência da bacia sedimentar do Alto Solimões, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 59-68, 2006.

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

LOSS, A.; TEIXEIRA, M. B.; OLIVEIRA, A. B.; LIMA, F. M.; CRUZ, R. B.; FONTANA, A.; PEREIRA, M. G. Fracionamento químico da matéria orgânica do solo em áreas sob diferentes coberturas vegetais e manejo agroecológico. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, n. 2, p. 1389-1393, 2007.

MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; BENITES, V. M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. Matéria Orgânica dos Solos Antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): Suas Características e Papel na Sustentabilidade da Fertilidade do Solo. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 172-188.

MARTINS, P. F. S.; CERRI, C. C.; VOLKOFF, B.; ANDREUX, F.; CHAUVEL, A. Consequences of cleaning and tillage on the soil of a natural Amazonian ecosystem. **Forest, Ecology and Management**, v. 38, n. 3-4, p. 273-281, 1991.

MATOSO, S. C. G.; SILVA, A. N.; FIORELLI-PEREIRA, E. C.; COLETA, Q. P.; MAIA, E. Frações de carbono e nitrogênio de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes usos na Amazônia brasileira. **Acta amazonica**, v. 42, n. 2, p. 231-240, 2012.

MENDONÇA, E. S.; ROWELL, D. L. Mineral and organic fractions of two oxisols and their influence on effective cation-exchange capacity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 1, p.188-192, 1996.

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

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2002. p. 626.

NEILL, C.; MELILLO, J. M.; STEUDLER, P. A.; CERRI, C. C.; MORAES, J. F. L.; PICCOLO, M. C.; BRITO, M. Soil carbon and nitrogen stocks following Forest clearing for pasture in the southwestern Brazilian Amazon. **Ecological Applications**, v. 7, n. 4, p. 1216-1225, 1997.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D. L.; PAGA, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMMER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis: Chemical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 961-1010.

NOVOTNY, E.H.; DEAZEVEDO, E.R.; BONAGAMBA, T.J.; CUNHA, T.J.F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; HAYES, M. H. B. Studies of the compositions of humic acids from Amazonian Dark Earth soils. **Environmental Science and Technology**, v. 41, n. 2, p. 400-405, 2007.

PULRONIK, K.; BARROS, N. F.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BRANDANI, C. B. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no vale do Jequitinhonha-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n. 5, p.1125-1136, 2009.

SANTOS, L. L.; LACERDA, J. J. J.; ZINN, Y. L. Partição de substâncias húmicas em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 955-968, 2013.

SOMBROEK, W. G.; KERN, D.; RODRIGUES, T.; CRAVO, M. S.; JARBAS, T. C.; WOODS, W.; GLASER, B. Terra Preta and Terra Mulata: Pré-Colombian Amazon Kitchen midden and agricultural fields, their sustainability and their replication. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 17., 2002, Thailand. **Anais**. Thailand: WSSS, 2002, p. 1-9.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry; genesis, composition, reactions**. New York: John Wiley & Sons, 1994. p. 496.

SWIFT, R. S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis: chemical methods**. Madison: Soil Science Society of America; American Society of Agronomy, 1996. p. 1011-1020.