

FRAÇÕES DE FÓSFORO SOB DIFERENTES USOS E CLASSES DE  
SOLO NA REGIÃO SUL DA BAHIA

**TARCIANA DE OLIVEIRA VIANA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
DEZEMBRO – 2016

FRAÇÕES DE FÓSFORO SOB DIFERENTES USOS E CLASSES DE  
SOLO NA REGIÃO SUL DA BAHIA

**TARCIANA DE OLIVEIRA VIANA**

Tese apresentada ao Centro de Ciências e  
Tecnologias Agropecuárias da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,  
como parte das exigências para obtenção do  
título de Doutor em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Antonio Carlos da Gama-Rodrigues

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
DEZEMBRO – 2016

**FICHA CATALOGRÁFICA PREPARADA PELA BIBLIOTECA DO LENEP**

631.422098142

V614f Viana, Tarciana de Oliveira

2016 Frações de fósforo sob diferentes usos e classes de solo na Região Sul da Bahia / Tarciana de Oliveira Viana. --- Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Laboratório de Solos, 2016. x, 88 f. : il.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal)

Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Antonio Carlos da Gama-Rodrigues.

Bibliografia: f. 35-41; 63-67; 69-76

1. Sistemas de uso da terra 2. Fracionamento de fósforo de Hedley 3. Fósforo orgânico 4. Método de extração por ignição 5. Método de extração com NaOH + EDTA I. Título.

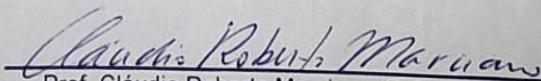
FRAÇÕES DE FÓSFORO SOB DIFERENTES USOS E CLASSES DE  
SOLO NA REGIÃO SUL DA BAHIA

TARCIANA DE OLIVEIRA VIANA

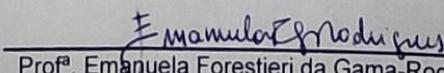
Tese apresentada ao Centro de Ciências e  
Tecnologias Agropecuárias da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,  
como parte das exigências para obtenção do  
título de Doutorado em Produção Vegetal

Aprovada em 16 de dezembro de 2016

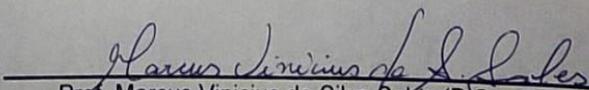
Comissão Examinadora



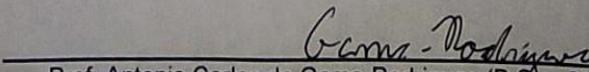
Prof. Cláudio Roberto Marciano (D.Sc, Solos e Nutrição de Plantas) - UENF



Profª. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues (Ph.D., Ciência do Solo) - UENF



Prof. Marcus Vinicius da Silva Sales (D.Sc., Produção Vegetal) - UNESA



Prof. Antonio Carlos da Gama-Rodrigues (D.Sc., Ciência do Solo) - UENF  
(Orientador)

A minha eterna Voinha (Crizantina), por ter me proporcionado coisas maravilhosas e por ter feito de mim o que sou hoje.

***Dedico***

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar, iluminar e me dar tranquilidade para seguir em frente com os meus objetivos e não desanimar com as dificuldades;

A Rivane Soares de Oliveira (Mainha), que sempre primou pela minha educação, além do amor, carinho, apoio e incentivo incondicional e pela força diante das dificuldades. Obrigada, por sempre se fazer presente em minha vida, mesmo estando a quase 8.000 km de distância de mim;

Aos meus irmãos, Philipe e Thaís, pelo apoio e carinho;

Ao meu namorado, Renato Valadares de Sousa Moreira, com quem eu sei que passarei por muitos e muitos momentos de felicidade como esta e que é a pessoa que a vida escolheu para ser meu companheiro nas horas boas e ruins;

Agradeço a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e ao Laboratório de Solos, pela oportunidade de realização deste curso;

A Fundação de Amparo à Pesquisa do estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pela concessão de bolsa de Doutorado;

Ao Professor Dr. Antonio Carlos da Gama-Rodrigues pela orientação;

Aos Professores Dr<sup>a</sup> Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues, Dr. Cláudio Marciano e Dr. Marcus Vinícius da Silva Sales pelas valorosas sugestões e contribuições nesse trabalho;

Aos laboratoristas Kátia Regina, Vanilda e Ederaldo por toda ajuda imprescindível durante a execução deste trabalho;

Aos colegas de laboratório, pela amizade, convivência e por compartilharem diversos momentos de tensão e alegria comigo dentro do trabalho.

A Maria Aparecida da Silva, por ter se tornado uma amiga sem igual, pelo companheirismo e bom humor constante.

A minha princesa canina, Mia, pelo carinho.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1 Fósforo e sua dinâmica no solo .....	4
2.2 Fósforo orgânico .....	7
2.3 Determinação de P no solo .....	9
2.3.1 Fracionamento sequencial de P.....	9
2.3.2 Determinação de Po .....	11
3. TRABALHOS.....	13
3.1 TRANSFORMAÇÃO DE FÓSFORO SOB DIFERENTES USOS E CLASSES DE SOLO NA REGIÃO SUL DA BAHIA .....	13
RESUMO.....	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUÇÃO.....	15
MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
Caracterização da área e amostragem do solo.....	17
Análises físicas e químicas do solo.....	19
Análise de dados.....	21
RESULTADOS.....	24
Distribuição das frações de P no solo.....	24

Relação entre as frações de P e atributos do solo.....	28
Transformação de P no solo.....	29
DISCUSSÃO.....	30
Distribuição das frações de P no solo.....	30
Relação entre as frações de P e atributos do solo.....	33
Transformação de P no solo.....	33
CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
3.2 ESTOQUE DE FÓSFORO ORGÂNICO NO SOLO SOB DIFERENTES USOS DA TERRA NA REGIÃO SUL DA BAHIA.....	42
RESUMO.....	42
ABSTRACT.....	43
INTRODUÇÃO.....	44
MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
Caracterização da área e amostragem do solo.....	46
Análises físicas e químicas do solo.....	48
Análise de dados.....	50
RESULTADOS.....	51
Métodos de determinação de Po do solo.....	51
Estoque de Po no solo.....	54
DISCUSSÃO.....	59
Métodos de determinação de Po do solo.....	59
Estoque de Po no solo.....	60
CONCLUSÕES.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
4. RESUMO E CONCLUSÕES.....	68
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

## RESUMO

VIANA, Tarciana de Oliveira, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Dezembro de 2016. **Frações de fósforo sob diferentes usos e classes de solo na Região Sul da Bahia.** Orientador: Prof. Antonio Carlos da Gama-Rodrigues. Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues.

Nos solos tropicais o fósforo (P), apesar de muitas vezes ocorrer em quantidades consideráveis, tanto nas formas orgânicas (Po) quanto inorgânicas (Pi), é um elemento encontrado em baixas concentrações na solução do solo, sendo o principal fator nutricional limitante para a produção agrícola e florestal. O estudo foi dividido em dois artigos, o primeiro com objetivo de avaliar a distribuição das frações de P no solo de distintas classes pedológicas e sob diferentes usos, relacionar o teor de P com os atributos químicos e físicos do solo, e elaborar um modelo de inter-relações entre as frações de P para determinar quais *pools* agem como fonte ou dreno de P sobre o *pool* disponível. As diferentes frações de P foram avaliadas através do fracionamento sequencial de Hedley em amostras de solo coletadas na Região Sul da Bahia, em três classes de solo (Argissolo Amarelo, Argissolo Acinzentado e Nitossolo Háplico) sob diferentes usos da terra (mata nativa, pasto, monocultura de seringueira, seringueira + açaí, seringueira + cacau, cacau + eritrina e seringueira + cupuaçu). Houve ampla variação dos teores de todas as frações de P entre as diferentes classes e usos da terra. O Nitossolo Háplico sob a cobertura Seringueira + Cacau se destacou em relação

aos demais sítios, apresentando as maiores concentrações de P em todas as frações estudadas. A relação entre as frações de P e os atributos do solo apresentou diversas correlações significativas, todas positivas, exceto para o Al. O modelo estrutural hipotético do ciclo do P no solo foi composto por quatro *pools* de P (variáveis latentes): o *pool* orgânico, *pool* ocluso, *pool* inorgânico e *pool* disponível, apresentando índices estatísticos que indicam ajuste geral aceitável ( $\chi^2 = 13,213$ ;  $df = 5$ ;  $p = 0,021$ ). O modelo estrutural foi adequado para identificar *pools* funcionais de P no solo e possibilitou a confirmação da contribuição positiva dos *pools* orgânico, ocluso e inorgânico para a disponibilidade de P na solução do solo. O segundo artigo, teve como objetivo avaliar o estoque total de P através da comparação entre duas metodologias de extração de P, com ênfase no Po total em diferentes sistemas de uso da terra. As frações de P foram extraídas através do método de ignição e do método de extração com NaOH + EDTA. Os resultados mostraram que o sistema de seringueira + cacau cultivado sobre Nitossolo Háplico apresentou os maiores estoques de P-Total (2.060,11 kg ha<sup>-1</sup> e 2.235,04 kg ha<sup>-1</sup>, método por Ignição e método NaOH + EDTA, respectivamente). O estoque médio de Po na profundidade de 0-100 cm foi de 1.165,96 kg ha<sup>-1</sup> e 1.398,53 kg ha<sup>-1</sup> (método por Ignição e método NaOH + EDTA, respectivamente). Quando avaliado o Po em diferentes profundidades do solo, observa-se que em todas as profundidades os sistemas apresentaram diferenças significativas entre si independente do método utilizado, a maior proporção de P-total foi extraída na profundidade de 0-40 cm (até 72% aproximadamente), enquanto que menos de 42% foi extraído a partir da 40-100 cm de profundidade. Os maiores estoques de Po foram encontrados nos sistemas agroflorestais (SAF's) para todas as profundidades independentes do método, e estes quando sobre Nitossolo apresentaram um aporte de até 30% superior em relação aos SAF's sobre Argissolo. A distribuição das frações de Po no solo foi influenciada pelo uso da terra e o método de extração com NaOH + EDTA (extração em meio básico) apresentou maior poder de extração de P no solo para as condições estudadas.

Palavras-chave: Sistemas de uso da terra; Fracionamento de fósforo de Hedley; Fósforo Orgânico; Método de ignição; Método de extração com NaOH + EDTA.

## ABSTRACT

VIANA, Tarciana de Oliveira, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. December, 2016. **Phosphorus fractions in different soil uses and classes in the south region of Bahia.** Advisor: Prof. Antonio Carlos da Gama-Rodrigues. Co-advisor: Prof<sup>a</sup>. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues

In tropical soils, phosphorus (P) although often occurring in considerable amounts in the soil, is an element found in low concentrations in the soil solution, and is the main limiting nutritional factor for agricultural and forestry production being found in organic (Po) and inorganic forms (Pi). The study was divided in two articles, the first aim to evaluate the distribution of P fractions in the soil of different pedological classes and under different uses, to relate the P content with the chemical and physical attributes of the soil, and to elaborate a model of the cycle of P to determine which pools act as a source or sink of P on the available pool. The different P fractions were evaluated through sequential Hedley fractionation in different land uses (native forest, pasture, rubber tree monoculture, rubber tree + açaí, rubber tree + cocoa, cocoa + eritrina and rubber tree + cupuaçu) located in the south region of Bahia, in three soil classes: Yellow Argisol (Ultisol), Gray Argisol (Ultisol) and Typic Hapludox (Oxisol). There was a wide variation of the contents of all the fractions of P between the different classes and uses of the land. Typic Hapludox under the rubber tree cover + cocoa stood out in relation to the other sites, presenting the highest concentrations of P in all fractions studied.

The relationship between the fractions of P and the attributes of the soil presented several significant correlations, all positive, except for Al. The hypothetical P cycle model in the soil was composed of four P pools (latent variables): the organic pool, the occluded pool, the inorganic pool and the available pool, presenting an acceptable general adjustment ( $\chi^2 = 13.213$ ;  $df = 5$ ;  $p = 0.021$ ;  $\chi^2/df = 2.64$ ; GFI = 0.911; RMSEA = 0.195; AIC = 45.21). The structural model was adequate to identify functional P pools in the soil and allowed the confirmation of the contribution of the organic, occluded and inorganic pools to the availability of P in the soil solution. The second article had as aim to evaluate the total P stock through the use of two distinct methodologies, with emphasis on the total Po in different land use systems. The P fractions were extracted using the ignition method and the NaOH + EDTA extraction method. The results showed that the system of rubber + cocoa on Typic Hapludox presented highest total P-Total stocks (195.81 Mg ha<sup>-1</sup> and 199.71 Mg ha<sup>-1</sup>, Ignition method and NaOH + EDTA method, respectively). The mean Po stock in the 0-100 cm depth was 11.66 Mg ha<sup>-1</sup> and 13.99 Mg ha<sup>-1</sup> (Ignition method and NaOH + EDTA method respectively). When evaluating the Po at different depths of the soil, it was observed that at all depths the systems showed significant differences between them, independent of the method used, the highest proportion of P-total was extracted at depth of 0-40 cm (up to 72% approximately), while less than 42% was extracted from 40-100 cm deep. The highest stocks of Po were found in the agroforestry systems (AFS's) for all depths independent of the method, and these when on Typic Hapludox presented a contribution of up to 30% higher in relation to the AFS's on Argisol. The distribution of Po fractions in the soil was influenced by land use and the extraction method with NaOH + EDTA (extraction in basic medium) presented higher P extraction power in the soil for the studied conditions.

Keywords: Land use systems; Hedley phosphorus fractionation; Organic Phosphorus; Ignition method; Extraction method with NaOH + EDTA.

## 1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P), apesar de muitas vezes ocorrer em quantidades consideráveis no solo, é o elemento que mais limita a produção agrícola (Novais e Smyth, 1999; Turner et al., 2003) e florestal (Turner e Engelbrecht, 2011), especialmente em regiões tropicais (Elser et al., 2007; Yang e Post, 2011). Os solos tropicais apresentam grande reatividade e alta retenção de P em sua fase sólida, principalmente com os óxidos de ferro e alumínio, fenômeno típico dos solos intemperizados, ocorrendo baixas concentrações deste na solução do solo (Barbieri et al., 2009; Stutter et al., 2015), mesmo quando os teores totais de P no solo são elevados (Gatiboni, 2003).

No solo, o P pode ser encontrado em formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi), sendo que ambas se diferenciam pela sua solubilidade. Sua distribuição ocorre de acordo com a disponibilidade em suprir a solução do solo (Richter et al., 2006), sendo dividida, segundo Pavinato et al. (2010), em: P lábil, definido pelo P da fase mineral em equilíbrio com a solução do solo; P moderadamente lábil, capaz de suprir a solução do solo de forma mais lenta, pois encontra-se retido com energia maior que o P lábil; e P não-lábil ou recalcitrante que está retido fortemente aos coloides do solo a ponto de não poder ficar disponível na solução do solo.

Em geral, nos solos tropicais, há um predomínio da fração inorgânica, como relatado por alguns autores (Guerra et al., 1996; Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008), porém o Po apresenta grande importância, pois este é, em grande parte, lábil e moderadamente lábil e atua na reposição do P na solução do solo quando este é absorvido pelas plantas (Guerra et al., 1996; Cunha et al., 2007; Dieter et al., 2010),

principalmente se encontra em sistemas sob pouca ou nenhuma adição de P lábil de insumos externos.

O uso e o manejo do solo alteram a dinâmica e a labilidade do P (Matos et al., 2006; Fontana et al., 2008; Pereira et al., 2010), onde a ciclagem de nutrientes, por meio da mineralização da matéria orgânica do solo (MOS), é capaz de fornecer o P para solução com menor suscetibilidade à precipitação e adsorção na fase mineral do solo. Isto ocorre através do bloqueio dos sítios de adsorção de P nas superfícies das argilas e óxidos de ferro e alumínio (Tirloni et al., 2009). Desta forma, o P está associado diretamente ao acúmulo de MOS, onde sistemas capazes de acumular MOS como os sistemas florestais e agroflorestais (Gama-Rodrigues et al., 2007), contribuem para o aumento das formas orgânicas de P, capazes de manter o P disponível para as plantas através do aumento de suas formas mais lábeis (Andrade et al., 2003).

Negassa e Leinweber (2009) afirmam que a composição do material vegetal e a quantidade de serapilheira afetam consideravelmente todas as frações do P, com grande impacto sobre as formas lábeis e moderadamente lábeis. Diversos autores afirmam que o manejo do solo e o tipo de vegetação afetam principalmente as formas orgânicas, as quais estão relacionadas com a atividade biológica do solo (Conte et al., 2002, Cardoso et al., 2003; Gatiboni et al., 2005).

A dinâmica e o grau de labilidade do P também são influenciados pelas características e propriedades do solo. As frações de maior labilidade são dependentes, além do grau de intemperismo do solo, da mineralogia, da textura, das características físicas e químicas do solo (Walker e Syers, 1976; Cross e Schlesinger, 1995).

O grau de intemperismo dos solos interfere na quantidade de P em solução, pois solos altamente intemperizados apresentam alta capacidade de adsorção de P (Novais e Smith, 1999), com reduzida fração de P biodisponível. O pH afeta a solubilidade dos minerais, as reações de adsorção-dessorção e a atividade microbiana, sendo esta responsável pela decomposição dos compostos orgânicos (Sato e Comerford, 2005). Raij (2004) relata que a maior disponibilidade de P na solução do solo será determinada na faixa de pH entre 5,0 e 6,2. Solos com maiores teores de argila apresentam um maior potencial de fixação de P e, conseqüentemente, a diminuição da sua disponibilidade para as plantas, principalmente quando essa argila é rica em óxidos de ferro e alumínio (Novais e Smyth, 1999).

Apesar da importância do  $P_o$  do solo, onde em sistemas não fertilizados o mesmo é a principal fonte de P-disponível para as plantas, suas formas não são quantificadas pelas análises químicas de rotina e são desconsideradas, já que não existem métodos diretos para sua quantificação no solo (Turner et al., 2005). Através da utilização de várias metodologias, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos com o intuito de quantificar e entender a dinâmica de formas ou frações de P ( $P_o$  e  $P_i$ ) em função, por exemplo, de diferentes sistemas de uso, classes de solo, grau de intemperismo (Condrón et al., 1990; Guerra et al., 1996; Dieter et al., 2010; Costa et al., 2015; Aleixo et al., 2016).

A compreensão do ciclo do P é importante no estabelecimento de técnicas de manejo e uso do solo que garantam aumento deste nutriente em sistemas de produção com pouca ou nenhuma entrada de insumos. Desta forma, a determinação da quantidade e a distribuição das frações de P no solo, através do método de fracionamento são úteis na investigação da dinâmica de P no solo. O método de fracionamento de P proposto por Hedley et al. (1982) tem sido utilizado para descrever as transformações que ocorrem com o P no solo, envolvendo extração sequencial das formas lábeis, moderadamente lábeis e recalcitrantes, por meio da qual as formas inorgânicas e orgânicas são separadas conforme sua disponibilidade às plantas.

O estudo das frações de P do solo é importante para melhorar o entendimento das transformações que ocorrem entre as frações de diferentes disponibilidades. Os diferentes sistemas de uso da terra e classes de solo são capazes de alterar a distribuição das frações de P, principalmente as frações orgânicas, tornando-se possível avaliar seu potencial para a nutrição das plantas através da ciclagem de nutrientes, em curto e longo prazo. Desta forma, o objetivo geral deste estudo foi avaliar a distribuição das frações de P através do fracionamento em diferentes sistemas de uso da terra e classes de solo. Os objetivos específicos foram: (1) avaliar as relações das frações de P com as propriedades físicas e químicas do solo com o intuito de saber quais variáveis exercem uma maior influência na disponibilidade das frações de  $P_o$  no solo; (2) estudar as transformações do P por meio de modelagem de equações estruturais; (3) comparar dois procedimentos analíticos de extração de P para avaliar o estoque de  $P_o$  no solo; (4) avaliar a variação do  $P_o$  nas diferentes camadas do solo.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Fósforo e sua dinâmica no solo

O fósforo (P) é um elemento essencial para o metabolismo das plantas, é o componente dos nucleotídeos que garante a estrutura helicoidal das moléculas de DNA e RNA, participa da formação dos fosfolipídios das membranas celulares, nas moléculas de ATP e ADP e em moléculas e compostos intermediários que participam de processos vitais como a respiração e a fotossíntese (Turner et al., 2005; Taiz e Zeinger, 2009; Childers et al., 2011; Brady e Weil, 2013).

Entre os macronutrientes, o P é exigido em menor quantidade pelas plantas (Raij, 1991) e apesar de muitas vezes ocorrer em quantidades consideráveis no solo, é o elemento que mais limita a produção agrícola (Novais e Smyth, 1999; Turner et al., 2003) e florestal (Turner e Engelbrecht, 2011), especialmente em regiões tropicais (Elser et al., 2007; Yang e Post, 2011). Smith et al. (2011) afirmam que a abundância do P é suprimida pela sua alta reatividade, conseqüentemente baixa disponibilidade nos solos, contribuindo com, aproximadamente, 0,2% da matéria seca das plantas.

Os solos brasileiros em sua maioria são ácidos e apresentam elevado grau de intemperismo, como, por exemplo, os Latossolos e Argissolos, sendo que a deficiência de P ocorre mesmo quando seu teor total é elevado, devido à forte interação deste com os minerais do solo, em particular os sesquióxidos de Fe e Al, resultando em baixos teores de P na solução do solo, limitando o rendimento

das culturas (Rolim Neto et al., 2004; Aray e Sparks, 2007; Novais et al., 2007; Shen et al., 2011), razão pela qual se obtêm acréscimos de produção através da aplicação de adubos fosfatados (Galvani et al., 2004).

De modo geral, o teor total de P dos solos varia entre 35 a 5.300 mg kg<sup>-1</sup>, com valores médios em torno de 800 mg kg<sup>-1</sup> (Essington, 2004), porém apenas uma pequena proporção deste (em geral, menos de 1%) encontra-se prontamente disponível para as plantas (Stewart e Tiessen, 1987). Os solos tropicais são deficientes em P, porque menos de 0,1% de todo o P encontra-se disponível na solução do solo (Novais et al., 2007).

No solo, o ciclo do P é controlado pelos processos de adsorção e dessorção, que podem disponibilizar o P ao solo em longo prazo, e por processos de imobilização do P inorgânico (Pi) e mineralização do P orgânico (Po), que podem disponibilizar P ao solo em curto prazo (Chen et al., 2003; López et al., 2006; Martinazzo et al., 2007). Em ecossistemas naturais sobre solos jovens, Tiessen et al. (1984) afirmam que a disponibilidade de P seja controlada pela dissolução do fosfato de minerais primários, já em solos mais intemperizados a decomposição e mineralização da MOS é uma das principais fontes de P para as plantas, pois o P-mineral já teria sido transformado em outras formas (Walker e Syers, 1976; Smeck, 1985).

Diversos fatores podem alterar a dinâmica de P no solo. A textura do solo afeta diretamente a distribuição das formas de P no solo (Souza et al., 2006; Eberhardt et al. 2008), bem como sua disponibilidade de P para as plantas. Essa influência está relacionada com a mineralogia da fração argila, que apresenta maior potencial de fixação de P, principalmente quando a argila é rica em óxidos de ferro e de alumínio (Novais e Smyth, 1999; Motta et al., 2002). A qualidade da fração argila pode ser definida a partir de sua atuação, como fonte ou dreno de P (Novais et al., 2007).

A distribuição das formas de P é bastante variável e dependente da intensidade de atuação dos fatores de formação do solo, sendo o grau de intemperismo um dos principais determinantes da quantidade de P em cada forma (Gatiboni et al., 2013). Walker e Syers (1976) afirmam que a quantidade, a forma e a distribuição do P no solo em ambientes naturais estão intimamente relacionadas ao intemperismo do solo, podendo inclusive auxiliar no entendimento da sua pedogênese. A disponibilidade de P em ecossistemas naturais varia com a

pedogênese, onde os processos geoquímicos podem determinar a distribuição do P nos solos em longo prazo, enquanto os processos biológicos influenciam a distribuição do P em curto tempo, porque a maioria do P disponível às plantas é derivado da MOS através dos processos de mineralização (Cross e Schlesinger, 1995).

O uso e o manejo do solo também promovem alterações sobre a dinâmica e a labilidade do P (Matos et al., 2006; Fontana et al., 2008; Pereira et al., 2010), onde a ciclagem de nutrientes, por meio da mineralização da MOS, é capaz de fornecer o P para solução com menor suscetibilidade à precipitação e adsorção na fase mineral do solo. Negassa e Leinweber (2009) afirmam que a composição do material vegetal e a quantidade de serapilheira afetam consideravelmente todas as frações do P, com grande impacto sobre as formas lábeis e moderadamente lábeis. Diversos autores afirmam que o manejo do solo e o tipo de vegetação afetam principalmente as formas orgânicas, as quais estão relacionadas com a atividade biológica do solo (Conte et al., 2002; Rheinheimer et al., 2002; Cardoso et al., 2003; Gatiboni et al., 2005). Assim, sistemas capazes de acumular matéria orgânica na superfície do solo, como os sistemas florestais e agroflorestais (Gama-Rodrigues et al., 2007), aumentam a disponibilidade de P em solução, pois com a degradação da MOS ocorre a liberação de ácidos orgânicos que podem reagir com os óxidos, bloqueando sítios de adsorção (Havlin et al., 2005).

Tiecher et al. (2012a,b) afirmam que as mudanças na dinâmica das formas orgânicas e inorgânicas de P do solo dependerão, além das condições já mencionadas, da habilidade das plantas em utilizar as reservas de P nas formas menos lábeis. As plantas possuem diferentes graus de adaptação para acessar o P presente no solo, através de modificações na morfologia, arquitetura, densidade e comprimento das raízes, alterações no pH rizosférico, exsudação de fosfatases e ácidos orgânicos, além de associações com fungos micorrízicos (Raghothama e Karthikey, 2005; Wang et al., 2008; Richardson et al., 2009). Tais alterações podem variar entre as espécies vegetais, onde algumas aproveitam o  $P_i$  através das raízes ou associações com micorrizas e outras utilizam  $P_o$  como fonte de nutriente através de mecanismos enzimáticos especializados (Turner, 2008).

No solo o fósforo é encontrado sob duas formas: inorgânica ( $P_i$ ) e orgânica ( $P_o$ ), que, de acordo com seu grau de estabilidade ou solubilidade,

apresentam diferentes disponibilidades para absorção pelas plantas (Gatiboni et al., 2007), sendo ainda classificadas como lábil, moderadamente lábil e não lábil ou recalcitrante (Gatiboni et al., 2005; Pavinato et al., 2010). As formas lábeis são representadas pelos compostos fosfatados capazes de repor o P a solução do solo, sendo dependentes do grau de intemperização do solo, da mineralogia, da textura, do teor de MOS, das características físico-químicas e da vegetação predominante (Walker e Syers, 1976; Cross e Schlesinger, 1995). As formas moderadamente lábeis são representadas pelo P quimiosorvido a óxidos de ferro e alumínio e fisicamente protegidos nas superfícies internas dos microagregados e P ligado ao cálcio (material de origem) (Cross e Schesinger, 1995). O P não lábil ou recalcitrante é aquele retido com maior energia ao solo e está fortemente adsorvido ou precipitado em compostos insolúveis (Novais et al., 2007; Rheinheimer et al., 2008a).

## 2.2 Fósforo orgânico

O fósforo orgânico no solo é proveniente dos restos vegetais e animais adicionados ao solo e das células e resíduos de decomposição microbiana (Rheinheimer et al., 2000; Pierzynski et al., 2005; Martinazzo et al., 2007), podendo variar de 4% do total de p em solos com baixos teores de MOS a 90% em solos orgânicos (Anghinoni e Bissani, 2004) e sua maior parte (aproximadamente 90%) encontra-se em formas protegidas química e fisicamente (Hedley et al., 1982). Suas principais formas conhecidas são os fosfatos de inositol (10 a 80% do Po total), fosfolipídios (0,5 a 7% do Po total), ácidos nucleicos (cerca de 3% do Po total) e outros ésteres fosfato (cerca de 5% do Po total) (Rheinheimer et al., 2002), compostos estes que são usados como fonte de carbono pelos microrganismos, resultando em sua mineralização e disponibilização de fósforo na solução do solo (Santos et al., 2008).

Nos solos tropicais sob sistemas naturais, o Po é a principal fonte do nutriente às plantas, já que este atua ativamente na disponibilidade de P (Walker e Syers, 1976; Tiessen et al., 1984; Cross e Schilesinger, 1995; Cunha et al., 2007; Vincent et al., 2010), devido à sua ciclagem acelerada em formas orgânicas mais lábeis (Silva e Mendonça, 2007), indicando que o teor de Po aumenta quando o manejo favorece o incremento de carbono (Reddy et al., 2000) e, em

solos cultivados, torna-se fonte apenas em condições de baixa disponibilidade de P (Gatiboni et al., 2005).

Com isso, o Po tende a reduzir os efeitos do processo de adsorção de Pi, pela fase mineral do solo, tornando-se mais disponível às plantas, podendo também ser afetado pela quantidade de MOS e pela mudança da cobertura vegetal presente no solo (Solomon et al., 2002; Zaia, 2005).

Vários autores verificaram que em solos intemperizados o Po apresenta capacidade de reposição de P quando da absorção pelas plantas (Tiessen et al., 1984; Guerra et al., 1996; Zamuner et al., 2008; Partelli et al., 2009; Dieter et al., 2010). Tiessen et al. (1984) afirmaram que, em solos pouco intemperizados a contribuição do Po é de 14% na nutrição das plantas, enquanto nos solos mais intemperizados sua contribuição pode chegar a 80%.

Estudo realizado nos solos brasileiros por Guerra et al. (1996) encontrou, para um Latossolo Vermelho-Amarelo A húmico, a participação do Po chegando a 24% do P total desse solo, com a concentração de Po variando entre 7 e 272 mg kg<sup>-1</sup>, onde as frações de Po lábil superaram as frações de Pi lábil, com o Po lábil correspondendo a mais de 60% da fração lábil. Cunha et al. (2007) observaram que, em solos sob floresta, a contribuição do Po foi de aproximadamente 80% da fração P lábil. Gatiboni et al. (2007), avaliando solos adubados, observaram que a contribuição do Po para a nutrição das plantas foi de 46,4% , e aumentou para 75,1% no solo sem a adição de fertilizantes.

Oliveira et al. (2014), trabalhando com 38 horizontes superficiais de diferentes classes de solo coletados em vários estados brasileiros, observaram que o Po participou, em média, com 36%, 39% e 46% do P total, para Chernossolos, Latossolos com horizonte A húmico e Organossolos, respectivamente. Nos Organossolos essa fração chegou a compor quase 50% do P total do solo. Nos Latossolos com horizonte A húmico houve uma maior variação na distribuição da fração orgânica, variando entre 12% a 68%. Tiecher et al. (2012b) afirmam que, em solos intemperizados ou deficientes em P, o papel das suas formas orgânicas em suprir a solução do solo é altamente relevante.

Nos solos tropicais, em geral, há um predomínio da fração inorgânica como relatado por alguns autores (Guerra et al., 1996; Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008). Porém, o P disponível está relacionado à fração orgânica do solo, desta forma, o percentual do Po lábil é maior que o percentual do Pi lábil nesses

solos (Oliveira et al., 2014). Apesar de apresentar elevada importância para a nutrição das plantas, ele é menos estudado que o  $P_i$  e muitas vezes a sua fração é desconsiderada pelos métodos químicos que avaliam a disponibilidade de P no solo, pois não existem métodos diretos para quantificar o  $P_o$  do solo (Turner et al., 2005).

### 2.3 Determinação de P no solo

Os métodos comumente utilizados para estimar o P no solo determinam o reservatório inorgânico lábil e geralmente são utilizados para estimar a necessidade de adubação fosfatada. Silva e van Raij (1999) afirmam que existem controvérsias quanto aos inúmeros métodos desenvolvidos para estimar a disponibilidade de P, já que cada metodologia extrai diferentes quantidades de P dependendo do tipo de extrator utilizado e existe dificuldade de uma metodologia avaliar a disponibilidade de P em um grande número de solos devido ao comportamento complexo deste elemento no solo.

Apesar da importância do  $P_o$  do solo, o qual em sistemas não fertilizados é a principal fonte de P para as plantas, a determinação do P-disponível do solo pelos métodos de rotinas, pode não representar a real capacidade de solo em se manter com o tamponamento de P para a absorção pelas plantas em médio e longo prazo. Nesse sentido, vários trabalhos têm demonstrado a importância da fração de  $P_o$  na ciclagem e para a nutrição das plantas em regiões tropicais (Guerra et al., 1996; Zaia et al., 2008a,b; Dieter et al., 2010; Zaia et al., 2012). Através da utilização de várias metodologias, esses trabalhos têm sido desenvolvidos com o intuito de quantificar e entender a dinâmica de formas ou frações de P ( $P_o$  e  $P_i$ ) em função, por exemplo, de diferentes sistemas de uso, classes e grau de intemperismo dos solos.

#### 2.3.1 Fracionamento sequencial de P

Hedley et al. (1982) propuseram o fracionamento sequencial no qual se quantifica o P nos diferentes compartimentos do solo, tanto as formas inorgânicas quanto as orgânicas, das mais disponíveis às mais estáveis (Tiessen et al., 1984; Ball-Coelho et al., 1993; Tokura et al., 2002; Silva et al., 2003; Camargo et al.,

2008; Gatiboni et al., 2013). Esse fracionamento é caracterizado como uma técnica sequencial onde são adicionados extratores químicos de força crescente, obtendo progressivamente frações de Pi e Po mais disponíveis até as mais estáveis. Sequencialmente:

- 1º. A extração é feita com resina trocadora de ânions (RTA), e nela são extraídas as formas disponíveis de Pi (Pi-Resina);
- 2º. A solução  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 8,5 extrai formas lábeis de Pi e Po (Pi- $\text{NaHCO}_3$  e Po- $\text{NaHCO}_3$ ). O P extraído por esse extrator contribui ativamente para o fornecimento do nutriente às plantas, pois representa o P facilmente mineralizável (Gatiboni et al., 2007);
- 3º. A solução de  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , extrai o Pi- $\text{NaOH}$  ligado aos óxidos de alumínio e ferro e às argilas silicatadas com energia de ligação intermediária, e o Po- $\text{NaOH}$  de formas moderadamente lábeis ligadas aos ácidos húmicos;
- 4º. A extração com solução  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  aliada à sonificação, extrai as formas química e fisicamente protegidas nas superfícies internas dos microagregados (Pi- $\text{NaOH}$  + Sonic e Po-  $\text{NaOH}$  + Sonic);
- 5º. A extração com solução de  $\text{HCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ , que extrai Pi contido nos fosfatos de cálcio é fortemente adsorvida, considerada de pouca labilidade;
- 6º. O processo final do fracionamento ocorre com a digestão do solo com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$ , extraíndo o P residual do solo (inorgânico + orgânico), considerado P recalcitrante que contribui para a nutrição das plantas em longo prazo ou em situações de extrema escassez de P no solo (Gatiboni et al., 2005).

Como principal vantagem, o método proposto por Hedley et al. (1982) permite a identificação das formas inorgânicas e orgânicas de P presente no solo, além de apresentar informações sobre sua disponibilidade em curto e longo prazos (Zamuner et al. 2008). Isso decorre de: (i) determinação dos valores das várias frações de P presente nos diferentes compartimentos do solo (Silva et al., 2003); (ii) quantifica o Po lábil presente no solo (Tokura et al., 2002); e (iii) pode ser empregado para acompanhar as modificações nas formas de P ao longo dos processos que ocorrem no solo (Araújo e Salcedo, 1997), levando em consideração o ecossistema, o uso e as diferentes classes de solos (Negassa e Leinweber, 2009).

Cross e Schlesinger (1995) relataram que o método de fracionamento de Hedley et al. (1982) é mais efetivo no estudo do ciclo biogeoquímico do P do solo em ecossistemas naturais, e que esse fracionamento consegue, ainda, descrever de forma precisa as transformações de P ao longo do desenvolvimento do solo de acordo com os processos biológicos na dinâmica dos *pools* de P. Condrón e Newman (2011) reconheceram o papel importante do método de fracionamento de Hedley et al. (1982) no estudo da dinâmica do fósforo nos solos, e forneceram recomendações específicas sobre este procedimento com a finalidade de minimizar as limitações e avançar quanto à utilidade deste método.

Rheinheimer et al. (2000) relatam que a publicação do método de Hedley et al. (1982) é um divisor metodológico importante, pois, a partir dele, inúmeros trabalhos têm sido realizados em diferentes tipos de solo. Inúmeras são as revisões bibliográficas produzidas que apresentam informações importantes sobre o fracionamento de Hedley et al. (1982) em solos tropicais, solos temperados e sedimentos, como, por exemplo: Petterson et al. (1988); Cross e Schlesinger, (1995); Johnson et al. (2003); Negassa e Leinweber (2009); Condrón e Newman (2011).

O fracionamento sequencial do P de Hedley et al. (1982) e suas modificações realizadas ao longo do tempo, têm sido usados visando adequá-los aos aparatos laboratoriais disponíveis e às características dos solos. Desta forma, Gatiboni et al. (2013) afirmam que não há um protocolo de fracionamento que descreva precisamente todas as interações entre os diferentes solos e coberturas vegetais, e com isso a adequação da metodologia para que melhor atenda aos atributos estudados se faz necessária para a quantificação mais precisa do P presente nos diferentes solos.

### 2.3.2 Determinação de Po

Como observado, a quantificação do Po se dá por métodos indiretos, as soluções extratoras de Po também solubilizam formas inorgânicas, sendo necessária a determinação do P total para calcular o Po por diferença. Os métodos utilizados para determinar o Po no solo podem não exprimir o real valor total deste no solo, pois as diferenças que ocorrem nos valores totais obtidos em um método em relação a outro, podem não significar maior quantidade de Po total

no solo, mas sim o aumento da solubilidade do P (Bowman et al., 1989). Assim, um método ideal para determinação de P no solo seria aquele que além da facilidade, preservasse praticamente todo o Po no extrato e recuperasse a maior quantidade de P.

No método de ignição, as amostras são submetidas a altas temperaturas que variam de 200 a 600°C, com posterior extração do P total com soluções ácidas. O Po é estimado calculando-se a diferença do P total extraído da amostra que sofreu processo de ignição e não-ignificada (Santos et al., 2008a). Como principal vantagem do método de ignição tem-se possibilidade de processamento simultâneo de diversas amostras, e como desvantagem o fato de que podem ocorrer erros devido à oxidação incompleta, pois durante a queima da matéria orgânica, podem ocorrer perdas por volatilização, destruição e mineralização incompleta do Po e alterações na solubilidade de Pi (Condrón et al., 1990). Aumento na solubilidade de Pi das amostras ignificadas ocasiona superestimação dos resultados, principalmente em solos tropicais intemperizados (Turner et al., 2005).

Os extratores mais eficientes para formas orgânicas são os alcalinos, destacando-se o NaOH e o NaHCO<sub>3</sub> (Hedley et al., 1982; Bowman et al., 1978), pois promovem ou aumentam as cargas negativas, repelindo íons fosfato e trocando cátions polivalentes por monovalentes. A extração por meio de extratores com soluções de NaOH + EDTA (ácido etilenodiaminotetracético) (Turner e Engelbrecht, 2011) caracteriza-se por promover a extração da fração dos compostos orgânicos e, por consequência, de Po. É comumente utilizada em técnica RMN (ressonância magnética nuclear) (Turner e Engelbrecht, 2011), pois esta possibilita a identificação das formas de P, principalmente orgânicas.

### 3. TRABALHOS

#### 3.1 TRANSFORMAÇÃO DO FÓSFORO SOB DIFERENTES USOS E CLASSES DE SOLO NA REGIÃO SUL DA BAHIA

##### RESUMO

Nos solos tropicais, o fósforo (P) apesar de muitas vezes ocorrer em quantidades consideráveis no solo, é um elemento encontrado em baixas concentrações na solução do solo, e é o principal fator nutricional limitante para a produção agrícola e florestal, sendo encontrado nas formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi). O objetivo do estudo foi, a partir da avaliação da distribuição das frações de P no solo de distintas classes pedológicas e sob diferentes usos, relacionar o teor de P com os atributos químicos e físicos do solo, e elaborar um modelo do ciclo de P para determinar quais *pools* agem como fonte ou dreno de P sobre o *pool* disponível. Foram avaliadas as diferentes frações de P através do fracionamento sequencial de Hedley em diferentes usos da terra (mata nativa, pasto, monocultura de seringueira, seringueira + açaí, seringueira + cacau, cacau + eritrina e seringueira + cupuaçu) localizados na Região Sul da Bahia, em três classes de solo: Argissolo Amarelo, Argissolo Acinzentado e Nitossolo Háplico. Os resultados demonstraram ampla variação dos teores de todas as frações de P entre as diferentes classes e usos da terra. O Nitossolo Háplico sob a cobertura Seringueira + Cacau se destacou em relação aos demais sítios, apresentando as maiores concentrações de P em todas as frações estudadas. A relação entre as

frações de P e os atributos do solo, apresentou diversas correlações significativas, todas positivas, exceto para o Al. O modelo estrutural hipotético do ciclo do P no solo foi composto por quatro *pools* de P (variáveis latentes): o *pool* orgânico, *pool* ocluso, *pool* inorgânico e *pool* disponível, apresentando ajuste geral aceitável ( $\chi^2 = 13,213$ ;  $df = 5$ ;  $p = 0,021$ ;  $\chi^2/df = 2,64$ ; GFI = 0,911; RMSEA = 0,195; AIC = 45,21). O modelo estrutural foi adequado para identificar *pools* funcionais de P no solo e possibilitou a confirmação da contribuição dos *pools* orgânico, ocluso e inorgânico para a disponibilidade de P na solução do solo.

Palavras-chave: Usos da terra; Fracionamento sequencial de P; Modelagem de equações estruturais.

#### ABSTRACT

In tropical soils, phosphorus (P) although it often occur in considerable quantities in the soil, it is an element found in low concentrations in the soil solution, and is the main limiting nutritional factor for the agricultural and forestry production being found in organic (Po) and inorganic forms (Pi). The aim of the study was to, based on the evaluation of the distribution of P fractions in soil in different soil classes and under different uses, relate the P content with the chemical and physical soil properties, and design a model of the P cycle to determine which pools act as a source or sink of P on the available pool. We evaluated the different fractions of P through sequential fractionation Hedley in different land uses (native forest, pasture, monoculture rubber tree, rubber + acai, rubber + cocoa, cocoa + erythrina and rubber + cupuassu) located in southern Bahia in three soil classes: Yellow Argisol (Ultisol), Gray Argisol (Ultisol) and Typic Hapludox (Oxisol). There was wide variation in the levels of all fractions of P among the different classes and land uses. The Typic Hapludox under the Rubber cover / Cocoa stood out compared to the other sites, with the highest concentrations of P in all studied fractions. The relationship between the P fractions and soil properties, presented several significant correlations, all positive, except for Al. The hypothetical structural model of P cycle in soil consisted of four pools of P (latent variables): the organic pool, occluded pool, mineral pool and available pool, with acceptable

overall fit ( $\chi^2 = 13,213$ ;  $df = 5$ ;  $p = 0,021$ ;  $\chi^2/df = 2,64$ ; GFI = 0,911; RMSEA = 0,195; AIC = 45,21). The structural model was adequate to identify functional pools of soil P and enabled the confirmation of the contribution of organic pools, occluded and inorganic to the availability of P in the soil solution.

Keywords: Agroforestry; Phosphorus Fractionation Hedley; Structural Equation Modeling.

## INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é o elemento que mais limita a produção florestal (Turner e Engelbrecht, 2011), especialmente em regiões tropicais (Elser et al., 2007; Yang e Post, 2011). Os solos tropicais apresentam grande reatividade e alta retenção de P em sua fase sólida, principalmente com os óxidos de ferro e alumínio, fenômeno típico dos solos intemperizados, ocorrendo baixas concentrações deste na solução do solo, ou seja, é pouco disponível às plantas (Barbieri et al., 2009; Stutter et al., 2015), mesmo que os teores totais de P no solo sejam elevados (Gatiboni et al., 2003).

Nos ecossistemas naturais ou em sistemas com baixa ou nenhuma adição de P, a disponibilidade do elemento está diretamente relacionada à ciclagem das formas orgânicas, proveniente da deposição da serapilheira (Johnson et al., 2003; Cunha et al., 2007; Turner, 2008; Zaia et al., 2008; Vincent et al., 2010) e renovação de raízes, onde as plantas absorvem o P mineralizado diretamente da decomposição da matéria orgânica do solo (MOS), sem que ocorra adsorção de P pelos óxidos de ferro e alumínio (Vicent et al., 2010), ocorrendo a sustentabilidade do sistema mesmo sem a adição de fertilizantes e em solos com baixa disponibilidade de P.

No solo, o P pode ser encontrado em formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi), sendo que estas se diferenciam pela sua solubilidade. Sua distribuição ocorre de acordo com a disponibilidade em suprir a solução do solo (Richter et al., 2006), sendo divididas, segundo Pavinato et al. (2010), em: P lábil, formado pelo P da fase mineral em equilíbrio com a solução do solo; P moderadamente lábil, aquele capaz de suprir a solução do solo de forma mais lenta, pois encontra-se

retido com energia de maior força que o P lábil; e P não-lábil ou recalcitrante, que está retido fortemente aos coloides do solo a ponto de não estar disponível na solução do solo.

Diversos são os fatores que interferem na disponibilidade de P para as plantas, uma vez que as plantas absorvem P da solução do solo e a fase sólida passa a ser a fonte potencial desse nutriente, de modo que a abordagem desses fatores deve considerar as reações do P no sistema solo-planta, (Novais e Smyth, 1999). A compreensão do ciclo do P é importante no estabelecimento de técnicas de manejo e uso do solo que garantam aumento deste nutriente em sistemas de produção com pouca ou nenhuma entrada de insumos. Desta forma, a determinação da quantidade e a distribuição das frações de P no solo, através do método de fracionamento são úteis na investigação da dinâmica de P no solo. O método de fracionamento de P proposto por Hedley et al. (1982) tem sido utilizado para descrever as transformações que ocorrem com o P no solo, envolvendo extração sequencial das formas lábeis, moderadamente lábeis e recalcitrantes, por meio da qual as formas inorgânicas e orgânicas são separadas conforme sua disponibilidade às plantas.

O conhecimento sobre a natureza e a distribuição das frações de P pode fornecer informações importantes que permitam avaliar a disponibilidade do P no solo, porém não são suficientes para explicar as interações entre estas frações. Assim, alguns trabalhos usando a modelagem de equações estruturais (MEE) investigaram as interações das diferentes frações de P em solos tropicais e em diferentes usos da terra, visando compreender como as mudanças em um *pool* de P podem afetar (direta ou indiretamente) outros *pools* de P do modelo (Gama-Rodrigues et al., 2014; Sales et al., 2015; Costa et al., 2015).

A MEE permite investigar e explicar os múltiplos relacionamentos interdependentes através de dados empíricos e conceitos teóricos com a utilização de variáveis latentes (Hair et al., 2009). As variáveis latentes são incluídas nos modelos de equações estruturais para torná-los mais consistentes teoricamente com redução nos erros de mensuração (Sales et al., 2015). Com a construção de modelos hipotéticos, é possível demonstrar as inter-relações de causa e efeito entre os *pools* de P, visualizando as relações entre as variáveis mensuradas e latentes (não mensuradas).

Sendo assim, este estudo teve como hipótese que os diferentes usos e classes de solo alteram a distribuição das frações de P, com os sistemas acumuladores de MOS promovendo aumento nos estoques lábeis de P. Os objetivos do presente estudo foram: (1) avaliar a distribuição das frações de P nos diferentes usos e classes de solo, relacionando as frações com os atributos químicos e físicos do solo; (2) elaborar um modelo do ciclo do P no solo para determinar as interações entre as frações de P e identificar quais os *pools* agem como dreno ou fonte de P sobre o *Pool* Disponível.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Caracterização da área e amostragem do solo

As áreas de estudo estão localizadas na Estação Experimental Djalma Bahia (EDJAB), no município de Una (15° 16' S, 30° 4' W), e no Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC), situado na sede da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), no município de Ilhéus (14° 47' S 39° 02' W), no Sul do Estado da Bahia, Brasil. O clima da região é AF (Köppen), com pluviosidade média de 2.000 mm e temperatura média de 25 °C.

Três classes de solo foram selecionadas, sendo estas o Argissolo Amarelo, o Argissolo Acinzentado e o Nitossolo Háplico, classificados de acordo com a Embrapa (2013). Foram avaliados 11 sítios, que estão descritos na Tabela 1.

As amostras de solo foram coletadas em abril de 2012, início do período chuvoso da região. Na parte central de cada sistema, foram delimitadas quatro parcelas de 30 m<sup>2</sup> distantes entre si por aproximadamente 100 m, onde foi aberta uma trincheira de 1 x 1 x 1,5 m, entre as linhas das culturas. Em cada trincheira o solo foi coletado na camada de 0-10 cm. Após a coleta, as amostras foram identificadas e acondicionadas em sacos plásticos, sendo, em seguida, transportadas para o laboratório, secas ao ar e peneiradas a 2 mm de malha, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA).

Tabela 1. Descrição dos diferentes sítios selecionados incluindo as diferentes classes de solos.

Solo	Sítio	Sítio	Idade (anos)	Forma de manejo
Argissolo Amarelo	1	Floresta natural	-	Fragmento de Mata Atlântica
	2	Pastagem	30	<i>Brachiaria decumbens</i> , antes da instalação a área passou por período de abandono com predomínio de plantas daninhas
	3	Seringueira (monocultura)	35	Plantios puros de seringueira com espaçamento de 7x3 m (476 plantas ha <sup>-1</sup> )
Argissolo Acinzentado	4	Floresta natural	-	Fragmento de Mata Atlântica
	5	Pastagem	8	<i>Brachiaria decumbens</i> em substituição à floresta natural
	6	Seringueira (monocultura)	40	Plantios puros de seringueira com espaçamento de 7x3 m (476 plantas ha <sup>-1</sup> )
	7	Seringueira + Açai	30	Seringueira ( <i>Hevea brasiliensis</i> ) + açai ( <i>Euterpe oleraceae</i> ): fileira simples com espaçamento de 7x3 m para a seringueira e para o açai (476 plantas ha <sup>-1</sup> de seringueira e 476 plantas ha <sup>-1</sup> de açai)
	8	Seringueira + Cacau	35	Seringueira + cacau ( <i>Theobroma cacao</i> ): espaçamento 15x3 m para a seringueira entre fileira dupla de cacau com espaçamento de 3x3 m (222 plantas ha <sup>-1</sup> de seringueira e 1100 plantas ha <sup>-1</sup> de cacau)
Nitossolo Háplico	9	Cacau + Eritrina	30	<i>Erythrina (Erythrina glauca</i> Lour.) com espaçamento de 25x25 m, árvores de cacau com espaçamento de 3x3 m
	10	Seringueira + Cacau	8	Seringueira + cacau ( <i>Theobroma cacao</i> ): espaçamento 15x3 m para a seringueira entre fileira dupla de cacau com espaçamento de 3x3 m (222 plantas ha <sup>-1</sup> de seringueira e 1100 plantas ha <sup>-1</sup> de cacau)
	11	Seringueira + Cupuaçu	30	Seringueira + cupuaçu ( <i>Theobroma grandiflorum</i> (Willd. ex Spreng.) K. Schum.): com espaçamento 7x3 m para a seringueira e para o cupuaçu (476 plantas ha <sup>-1</sup> de seringueira e 476 plantas ha <sup>-1</sup> de cupuaçu)

## Análise física e química do solo

O C orgânico total foi determinado por oxidação com  $K_2Cr_2O_7$   $1,25 \text{ mol L}^{-1}$  em meio ácido (Anderson e Ingram, 1996) e N total pelo método Kjeldahl. Os demais atributos químicos foram determinados de acordo com EMBRAPA (1999). O pH foi mensurado com um eletrodo de vidro em suspensão de solo em água deionizada; a granulometria foi realizada pelo método da pipeta. Ca, Mg e Al trocáveis foram extraídos com 1 M KCl, K foi extraído com Mehlich-1 e as concentrações de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Al^{3+}$  nos extratos foram determinadas por espectrofotômetro de absorção atômica e as concentrações de K foram determinadas por espectrofotômetro de emissão de chama. Na determinação da acidez potencial (H + Al), foram utilizados  $5,0 \text{ cm}^3$  de TFSA e 75 mL da solução de  $Ca(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 7,0, em erlenmeyer de 125 mL, 25 mL do sobrenadante foi titulado com NaOH 0,025N. A soma de bases (SB) se deu através da fórmula:  $Ca^{2+} + K^+ + Mg^{2+}$  e a capacidade de troca de cátions a pH 7 (CTC) através da fórmula:  $Ca^{2+} + K^+ + Mg^{2+} + (H^+ + Al^{3+})$ . O percentual de saturação de bases foi determinado através da fórmula:  $(SB / CTC) \times 100$ . O fósforo total foi determinado como proposto por Hedley et al. (1982) com a digestão em  $H_2SO_4 + H_2O_2$  de 0,1 g de solo seco e macerado. Os resultados das análises físicas e químicas dos solos encontram-se na Tabela 2.

Na Tabela 3 está descrita de forma resumida a metodologia de extração sequencial de P do solo segundo Hedley et al. (1982) com as modificações propostas por Condrón et al. (1985). A extração iniciou-se com a pesagem de 0,5 g de TFSA, em tubos falcon de 15 mL. As frações de P do solo foram extraídas sequencialmente utilizando-se a resina trocadora de ânions (RTA) com dimensões de 1 x 5 cm (ANION 204UZRA);  $NaHCO_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 8,5, NaOH  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ; NaOH  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  adicionado de sonificação por 2 minutos; HCl  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ; e, ao final da sequência,  $H_2SO_4 + H_2O_2$  em bloco digestor a  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  para obtenção do P-Residual. Cada etapa da extração foi realizada durante 16 horas em agitador horizontal a 120 rpm em temperatura ambiente seguida de centrifugação a 6000 rpm por 20 minutos, reservando-se o sobrenadante (extrato), sendo adicionado mais 5 mL de NaCl  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  ao solo remanescente nos tubos, seguido de uma nova centrifugação a 6000 rpm por 5 minutos, sendo o sobrenadante colocado nos mesmos recipientes do extrato anterior.

Tabela 2. Propriedades físicas e químicas dos solos na camada de 0-10 cm sob diferentes usos da terra e classes de solo na Região Sul da Bahia.

Propriedades	<sup>a</sup> Sítios										
	Argissolo Amarelo			Argissolo Acinzentado				Nitossolo Háplico			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	115,6	91,4	237,4	456,9	426,4	483,8	489,5	573,0	523,6	562,5	416,1
pH	4,20	4,12	3,84	4,52	4,34	3,68	3,37	3,53	5,60	5,72	5,53
C total (g kg <sup>-1</sup> )	21,60	10,20	9,50	25,60	20,90	15,90	21,40	19,60	21,50	37,80	21,60
N total (g kg <sup>-1</sup> )	1,11	0,78	0,85	2,19	1,18	1,03	1,18	1,28	2,18	3,01	2,02
<sup>b</sup> P total (mg kg <sup>-1</sup> )	657,9	712,4	603,1	616,1	619,2	645,9	905,2	998,5	2.939,3	4.310,2	2.774,7
P Mehlich-1 (mg dm <sup>-3</sup> )	2,07	1,93	3,80	2,20	1,97	3,27	3,67	5,47	5,07	7,50	3,73
K <sup>+</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	29,67	63,67	7,50	25,00	34,00	19,00	25,33	24,67	29,67	34,67	41,00
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,87	1,03	0,13	0,13	1,37	0,20	0,40	0,50	4,30	13,43	8,53
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,37	0,50	0,10	0,40	0,50	0,20	0,20	0,50	3,03	4,70	2,80
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,70	0,40	0,70	1,20	0,40	1,40	1,90	1,40	0,10	0,00	0,00
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,32	1,69	0,25	0,59	1,96	0,45	0,67	1,06	7,41	18,30	11,44
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,92	5,82	2,42	3,89	11,26	7,68	6,87	8,83	17,88	23,50	18,44
V (%)	26,83	29,04	10,33	15,17	17,41	5,86	9,75	12,00	41,44	77,87	62,04

<sup>a</sup>Sítios: 1: Floresta Natural; 2: Pastagem; 3: Seringueira (monocultura); 4: Floresta Natural; 5: Pastagem; 6: Seringueira (monocultura); 7: Seringueira + Açaí; 8: Seringueira + Cacau; 9: Cacau + Eritrina; 10: Seringueira + Cacau; 11: Seringueira + Cupuaçu. Os sítios listados de 1 a 3 são cultivados sobre Argissolo Amarelo; de 4 a 8 são cultivados sobre Argissolo Acinzentado; de 9 a 11 são cultivados sobre Nitossolo Háplico. <sup>b</sup>P total foi extraído por digestão H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

O P-Total (Pt) em cada extrato ( $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup>; NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; e NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> adicionado de sonificação) foi determinado em uma alíquota do extrato proveniente das etapas iniciais de extração e submetido a autoclave a 121°C e 103 KPa por 3 horas adicionando-se 1 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  mol L<sup>-1</sup> e 10 ml de  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ , após resfriamento, sendo o volume completado para 20 mL com água destilada. As frações de Pt nesses extratos foram analisadas pelo método colorimétrico de Dick e Tabatabai (1977), após o ajuste do pH, usando p-nitrofenol como indicador. Para a quantificação das frações inorgânicas e do fósforo residual (P-Residual), todos os extratos foram analisados como proposto por Murphy e Riley (1962). O fósforo orgânico (Po) foi calculado por diferença entre a concentração do Pt (P inorgânico + P orgânico) e fósforo inorgânico (Pi) em cada extrato. Foram calculados também os percentuais de cada fração em relação ao Pt para cada sítio.

Tabela 3. Metodologia de extração sequencial de P e propriedades dos *pools* de P.

<sup>a</sup> Sequência de extração	Fração	<sup>b</sup> Propriedade
Resina trocadora de ânions saturada com 0,5 mol L <sup>-1</sup> $\text{NaHCO}_3$ (pH 8,5), 16h	Pi-Resina	Fração inorgânica de “P prontamente disponível” às plantas
0,5 mol L <sup>-1</sup> $\text{NaHCO}_3$ (pH 8,5), 16 h	Pi- $\text{NaHCO}_3$ ; Po- $\text{NaHCO}_3$	Fração inorgânica e orgânica de “P-lábil” capaz de suprir a solução do solo
0,1 mol L <sup>-1</sup> NaOH, 16 h	Pi-NaOH; Po-NaOH	Fração inorgânica e orgânica de P ligadas com maior energia ao Ferro e Alumínio do solo, nomeada “P-moderadamente lábil”
0,1 mol L <sup>-1</sup> NaOH + Sonificação, 16 h	Pi-NaOH Sonic; Po-NaOH Sonic	Fração inorgânica e orgânica de “P ocluso” em agregados
1,0 mol L <sup>-1</sup> HCl, 16 h	Pi-HCl	Formas de “P ligado ao Ca” que possuem disponibilidade restrita às plantas
$\text{H}_2\text{SO}_4$ + $\text{H}_2\text{O}_2$ , 200 °C por 2h	P-Residual	Formas de “P não disponível” em curto prazo às plantas

<sup>a</sup>Extração sequencial de Hedley et al. (1982) com modificações de Condon et al. (1985). <sup>b</sup>Novais et al (2007).

### Análise de dados

Cada sítio foi considerado um tratamento de efeito-fixo devido a diversas fontes de variação, tais como cinco composições de sistemas agroflorestais, dois monocultivos de seringueira, duas florestas naturais e duas pastagens. Adotou-

se a pseudorrepetição para as quatro parcelas fixas de cada sítio como em outros estudos recentes em sistemas florestais e agroflorestais (Dawoe et al., 2010; Fontes et al., 2014). Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade (Bartlett). Atendendo as pressuposições de normalidade e homogeneidade foi realizada a análise de variância (ANOVA). O teste de média Scott-Knot em 5% de probabilidade foi utilizado a fim de gerar o agrupamento das médias entre os sítios avaliados, realizado através do programa R 3.2.1 (R Core Team, 2016) e o pacote “easyanova” (Arnhold, 2013). A correlação entre as frações de P ( $n = 44$ ) e entre as frações de P e os atributos químicos e físicos do solo foi analisada pela correlação de Pearson ( $n = 11$ ), realizada através do programa R 3.2.1 (R Core Team, 2016) e pacote Hmisc (Frank e Harrell, 2013).

Os dados referentes às frações de P do solo nos sítios avaliados foram submetidos à análise de componentes principais (ACP), levando em consideração a similaridade do conjunto de dados no agrupamento dos sítios e classes de solo em diagramas gráficos com eixos de ordenação. Essa análise demonstra o grau das associações entre as frações de P com base nos diferentes sistemas de uso da terra e as classes de solo amostradas. As análises foram realizadas com programa R (R Core Team, 2016) e foram então analisadas usando o pacote Vegan 2.4-0 (Oksanen et al., 2016).

A modelagem de equações estruturais (MEE) foi utilizada para verificar as inter-relações entre os diferentes *pools* de P nos diferentes usos da terra e identificar quais *pools* agem como dreno ou fonte de P sobre o *pool* de P disponível. Para a construção do modelo foi utilizado o modelo estrutural básico proposto por Gama-Rodrigues et al. (2014), com base na relação entre as cinco variáveis latentes (*pools* de P) com indicadores múltiplos (frações P), em que as hipóteses testadas foram os efeitos diretos do *pool* orgânico, *pool* inorgânico, *pool* ocluso e *pool* mineral sobre o *pool* de P disponível (Figura 1). Os construtos foram assim formados: (i) *Pool* disponível - Pi-Resina; (ii) *Pool* Orgânico - Po-NaHCO<sub>3</sub> e Po-NaOH; (iii) *Pool* Inorgânico - Pi-NaHCO<sub>3</sub> e Pi-NaOH; (iv) *Pool* Ocluso - Po-NaOH + Sonic; Pi-NaOH + Sonic e P-Residual; (v) *Pool* Mineral – Pi-HCl.

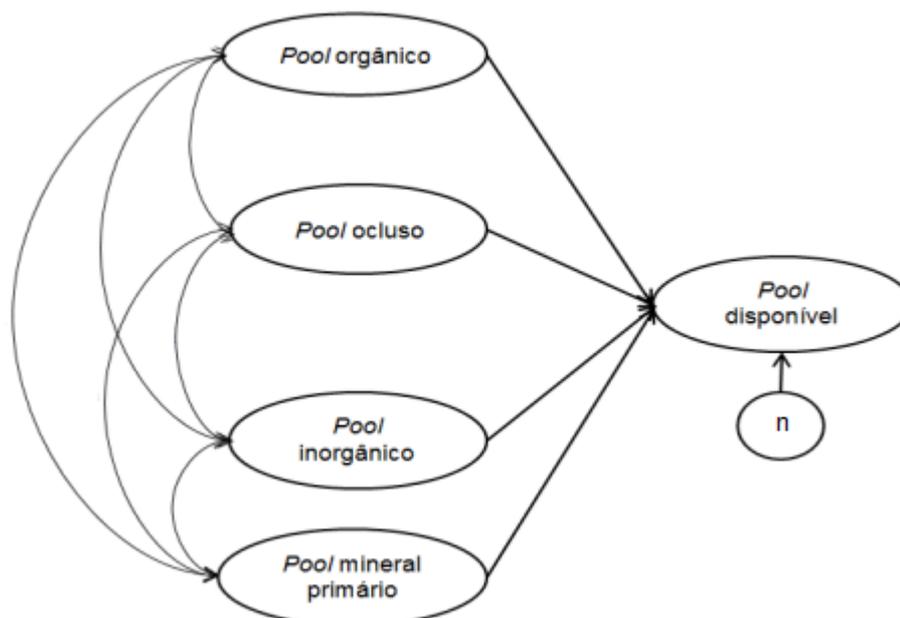


Figura 1. Modelo estrutural hipotético para o ciclo do P do solo por Gama-Rodrigues et al. (2014).

Para que o modelo se ajustasse foi necessário a retirada do construto *Pool Mineral* do modelo, além da variável Pi-NaOH do construto *Pool Inorgânico*, e da variável Pi-NaOH + Sonic do construto *Pool Ocluso*. Além disso, foi necessária a fixação de alguns parâmetros com o objetivo de tornar o modelo não identificado em um modelo identificado, assim tornando possível estimar os parâmetros livres (Grace, 2006). Para fixação foram utilizados critérios sugeridos por Sales et al. (2015), fixando variáveis de erros aleatórios e de cargas fatoriais. O valor do erro aleatório da variável observada Pi-Resina foi fixado como 0, assumindo que não ocorreram erros de medição, assim como sua carga fatorial foi fixada com o valor 1. As variáveis de erro dos construtos *Pool Ocluso* e *Pool Inorgânico* foram fixadas com o valor de 0,1. A variável de erro aleatório associado à variável observada Pi-NaHCO<sub>3</sub> também teve seu valor fixado com o valor de 0,1, pois em uma primeira análise estava resultando em valor negativo.

Para estimação dos parâmetros do modelo foi utilizado o método de máxima verossimilhança, sendo o ajuste geral do modelo avaliado com base no valor do qui-quadrado ( $X^2$ ), nível de probabilidade ( $p$ ) e grau de liberdade ( $df$ ). Como regra, o teste de  $X^2$  e um valor de  $p > 0,05$  indicam que o modelo hipotético apresentou ajuste satisfatório, no entanto, Schermelleh-Engel et al. (2003) sugerem que com valores de  $p$  entre 0,01 e 0,05 pode-se dizer que o ajuste é

aceitável, pois o objetivo da MEE é avaliar se os modelos estão teoricamente especificados, ou seja, a hipótese de nulidade deve ser aceita. Como o teste de qui-quadrado é sensível em relação ao tamanho da amostra, os índices de Qualidade de Ajuste (GFI), de Ajuste Comparativo (CFI), da Raiz do Erro Quadrático Médio de Aproximação (RMSEA) e a razão  $\chi^2/df$  foram também utilizados para a avaliação do ajuste do modelo. Valores dos índices  $GFI \geq 0,95$  e  $CFI \geq 0,90$ , valores de  $RMSEA \leq 0,10$  (Hair et al., 2009) e a razão  $\chi^2/df < 3$  (Iacobucci, 2010) são indicativos de ajuste apropriado para o modelo. O modelo foi analisado através do programa AMOS versão 21 (IBM – SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

## RESULTADOS

### Distribuição das frações de P

A concentração de P variou significativamente dentro de cada fração entre os sítios, onde os sistemas agroflorestais apresentaram valores médios superiores aos plantios puros de seringueira e aos sistemas usados como referência (floresta natural e pasto) em praticamente todas as frações estudadas, sendo que os cultivos sobre Nitossolo Háplico apresentaram os maiores teores de P (Tabela 4).

O teor de  $P_i$  extraído pela resina aniônica variou de 1,96 a 8,17 mg P kg<sup>-1</sup>, o  $P_i\text{-NaHCO}_3$  variou de 4,22 a 44,53 mg P kg<sup>-1</sup> e, o  $P_o\text{-NaHCO}_3$  apresentou teores entre 15,59 a 102,55 mg P kg<sup>-1</sup>. O P-Lábil ( $\Sigma$  das frações  $P_i\text{-Resina}$ ,  $P_i\text{-NaHCO}_3$ ,  $P_o\text{-NaHCO}_3$ ) variou de 23,36 a 155,25 mg P kg<sup>-1</sup>, onde a contribuição do  $P_o$  lábil foi em média 66,55%. Os sítios cultivados sobre Argissolo Acinzentado apresentaram maiores percentuais de P-Lábil, variando de 7,16 a 10,43%, enquanto os sítios cultivados sobre Nitossolo Háplico embora tenham apresentado o maior estoque desta fração quando comparados com os sítios sobre Argissolo, apresentaram o menor percentual de P-Lábil, variando de 3,38 a 4,23%.

O P moderadamente lábil representado pelo somatório das frações  $P_i$ -

NaOH, Po-NaOH, Pi- NaOH Sonic, Po-NaOH Sonic e Pi-HCl, variou de 280,27 a 839,12 mg P kg<sup>-1</sup>, chegando em média a 46,44% de todo o P presente no Argissolo independente do uso da terra. O P ocluso ( $\Sigma$  das frações Pi- NaOH Sonic e Po-NaOH Sonic), considerado como o P retido no interior dos agregados (moderadamente lábil) variou de 6 a 19,3% do P total. O P proveniente de mineral primário, representado pela fração Pi-HCl (P ligado ao Ca) apresentou os menores teores de P entre os sítios, com valores entre 1,61 a 5,74 mg P kg<sup>-1</sup>, os teores mais baixos foram encontrados nos sítios cultivados sobre Argissolo.

As frações orgânicas superaram as frações inorgânicas de P independente da classe e uso do solo. Os maiores teores de P foram encontrados na fração recalcitrante P-Residual (300,83 a 3595,40 mg P kg<sup>-1</sup>) e na fração de moderada labilidade Po-NaOH (97,36 a 261,67 mg P kg<sup>-1</sup>). O P-Residual chegou a compor em média 78,04% de todo o P presente no solo nos sítios sob Nitossolo Háplico.

Ao analisar as diferentes classes e usos da terra (Tabela 4), foi possível observar que o Nitossolo Háplico sob sistemas agroflorestais apresentou as maiores concentrações de P e que este se destacou em relação ao Argissolo Acinzentado também sob sistemas agroflorestais.

A análise de componentes principais (ACP) para as frações de P (Pi-Resina, Pi- NaOHCO<sub>3</sub>, Po- NaOHCO<sub>3</sub>, Pi-NaOH, Po-NaOH, Pi-NaOH + Sonic, Po-NaOH + Sonic, Pi-HCl, P-Residual, P-Total) nos diferentes sistemas de uso da terra, apresentou variância acumulada nos dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) de 92,75 %. Todas as frações de P, inclusive o P total contribuíram de forma semelhante para a CP1. Já na CP2 pode-se destacar o Po-NaOH e P-Residual, que apresentaram os maiores autovetores neste componente principal, contribuindo com -0,45 e 0,45, respectivamente (Figura 2).

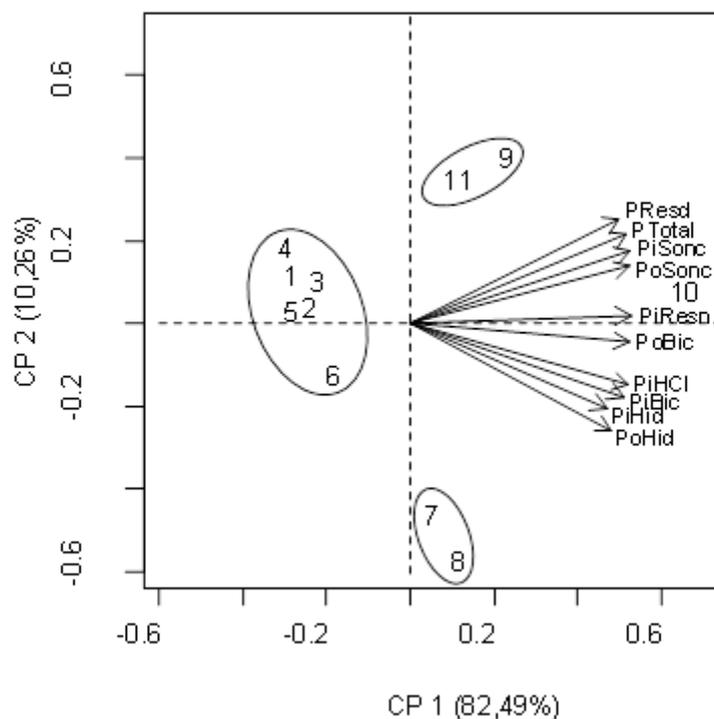


Figura 2. Diagrama de ordenação produzido pela análise de componentes principais das frações de P nos diferentes usos e classes de solo na Região Sul da Bahia. Sítios: 1: Floresta natural; 2: Pastagem; 3: Seringueira (monocultura); 4: Floresta natural; 5: Pastagem; 6: Seringueira (monocultura); 7: Seringueira + açaí; 8: Seringueira + cacau; 9: Cacau + eritrina; 10: Seringueira + cacau; 11: Seringueira + cupuaçu. Os sítios listados de 1 a 3 são cultivados sobre Argissolo Amarelo; de 4 a 8 são sítios cultivados sobre Argissolo Acinzentado; de 9 a 11 são sítios cultivados sobre Nitossolo Háplico.

De acordo com o diagrama de dispersão observa-se que o CP1 contribuiu para o agrupamento das áreas com floresta natural, pastagem e monocultura de seringueira do lado esquerdo da CP1, diferindo do SAF's do Argissolo e Nitossolo, que ficaram localizados do lado direito da CP1. Com relação a CP2 observa-se que os Argissolos sob SAF's (Seringueira + açaí e Seringueira + cacau) agruparam-se na parte inferior da CP2, apresentando dissimilaridade com o Nitossolo sob os SAF's de Cacau + eritrina, Seringueira + cacau e Seringueira + cupuaçu, que ficaram agrupados na parte superior da CP2 (Figura 2).

Tabela 4. Frações de P do solo sob diferentes sistemas de usos e classes de solo na Região Sul da Bahia.

	Pi-resina	Pi-NaHCO <sub>3</sub>	Po-NaHCO <sub>3</sub>	Pi-NaOH	Po-NaOH	Pi-Sonic	Po-Sonic	Pi-HCl	P-Residual	<sup>b</sup> Σ Pi	<sup>c</sup> Σ Po	P-Total
<sup>a</sup> Sítios	..... mg P kg <sup>-1</sup> .....											
1	2,75g	4,22j	16,63h	66,56g	104,21g	21,09j	86,80e	1,60e	360,63e	96,23i	207,64e	664,50g
2	2,03h	8,20i	26,05g	65,63g	121,04f	30,23i	87,84e	1,98e	346,89f	108,07h	234,93d	689,89f
3	4,39d	10,55h	15,27h	55,55h	97,36g	38,44h	87,78e	2,92d	333,15g	111,84h	200,40e	645,40g
4	2,57g	11,49h	37,92e	73,05f	105,41g	51,72g	92,28e	2,84d	323,00g	141,67g	235,60d	700,27f
5	1,97h	14,06g	38,91e	77,26e	109,49g	67,27e	78,73e	1,64e	300,83h	162,20e	227,12d	690,16f
6	3,29f	18,05f	32,11f	66,49g	113,17f	64,61f	79,40e	3,18d	307,17h	155,62f	224,68d	687,47f
7	3,94e	23,21e	67,30d	104,30b	196,00c	77,66d	114,17c	4,32c	374,62e	213,43d	377,47c	965,51e
8	5,80c	31,64d	73,16c	90,94d	217,06b	78,28d	99,54d	5,01b	427,50d	211,68d	389,76c	1028,93d
9	6,50b	34,61c	79,40b	97,75c	135,10e	129,53b	175,01b	4,73b	2423,45b	273,11b	389,51c	3086,06b
10	8,17a	44,53a	102,55a	118,35a	261,67a	172,15a	228,33a	5,74a	3595,40a	348,94a	592,55a	4536,89a
11	5,96c	38,52b	80,04b	98,68c	162,57d	118,95c	168,88b	3,29d	2173,90c	265,40c	411,49b	2850,79c
Média Geral	4,30	21,73	51,76	83,14	147,55	77,27	118,07	3,39	996,96	189,83	317,38	1504,17
CV (%)	5,44	4,70	4,88	2,08	5,28	1,44	6,35	8,92	1,05	1,37	3,48	0,93

Grupos de médias com letras diferentes nas colunas diferem entre si pelo teste "Scott-Knott" ( $P = 0.05$ ). <sup>a</sup> Sítios: 1: Floresta natural; 2: Pastagem; 3: Seringueira (monocultura); 4: Floresta natural; 5: Pastagem; 6: Seringueira (monocultura); 7: Seringueira + açaí; 8: Seringueira + cacau; 9: Cacau + eritrina; 10: Seringueira + cacau; 11: Seringueira + cupuaçu. <sup>b</sup>ΣPi = Pi-Resina + Pi-NaHCO<sub>3</sub> + Pi-NaOH + Pi-HCl + Pi Sonic. <sup>c</sup>ΣPo = Po-NaHCO<sub>3</sub> + Po-NaOH + Po-Sonic. Os sítios listados de 1 a 3 são cultivados sobre Argissolo Amarelo; de 4 a 8 são sítios cultivados sobre Argissolo Acinzentado; de 9 a 11 são sítios cultivados sobre Nitossolo Háplico.

### Relação entre as frações de P e atributos do solo

De acordo com os resultados obtidos através da correlação de Pearson, praticamente todas as frações de P estudadas apresentaram correlação positiva, exceto para as frações de moderada labilidade Pi-NaOH e Po-NaOH (Tabela 5).

Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson para as frações de P do solo nos diferentes usos do solo na Região Sul da Bahia (n = 44).

	Pi Resina	Pi NaHCO <sub>3</sub>	Po NaHCO <sub>3</sub>	Pi NaOH	Po NaOH	Pi- NaOH sonic	Po- NaOH sonic	Pi HCl
Pi-NaHCO <sub>3</sub>	0.84**							
Po-NaHCO <sub>3</sub>	0.83**	0.89**						
Pi-NaOH	0.73*	0.78**	0.76**					
Po-NaOH	0.74**	0.95**	0.84**	0.85**				
Pi- NaOH Sonic	0.89**	0.72*	0.84**	0.70*	0.65*			
Po- NaOH Sonic	0.85**	0.79**	0.82**	0.71*	0.69*	0.92**		
Pi-HCl	0.92**	0.91**	0.85**	0.86**	0.88**	0.80**	0.77**	
P-Residual	0.83**	0.67*	0.80**	0.57†	0.57†	0.97**	0.94**	0.69*

A relação entre as frações de P e as propriedades do solo apresentou diversas correlações significativas, todas positivas, exceto para o Al (Tabela 6). O teor de argila correlacionou-se positivamente com as frações Pi-NaHCO<sub>3</sub>, Po-NaOHCO<sub>3</sub>, Po-NaOH e Pi-HCl. O pH correlacionou-se com as frações Pi-NaOH, Po-NaOH, Pi-NaOH Sonic, Po-NaOH Sonic e P-Residual. A MOS com as frações Pi-NaHCO<sub>3</sub>, Po-NaHCO<sub>3</sub>, Po-NaOH, Po-NaOH Sonic, P-Residual.

O P extraível por Melich-1 correlacionou positivamente com as frações lábeis, indicando que os extratores agiram de modo semelhante no solo, podendo ambos serem usados para estimar a disponibilidade de P, porém eles não se substituem, já que são comparáveis em seus valores absolutos por apresentarem níveis críticos diferentes. A SB não correlacionou apenas com as frações Pi-NaOH e Po-NaOH. A CTC (T) correlacionou com todas as frações, exceto com a

fração Pi-NaOH. O alumínio ( $Al^{+3}$ ) apresentou correlação negativa apenas com P-Residual.

Tabela 6. Coeficientes de correlação de Pearson entre propriedades físicas e químicas dos solos e as frações de P nos diferentes usos e classes de solo na Região Sul da Bahia (n = 11).

	Arg	pH	C	N	P Melich-1	Al	SB	T
Pi-Resina	0,59	0,54	0,55	0,69*	0,91**	-0,31	0,75**	0,74**
Pi-NaHCO <sub>3</sub>	0,77**	0,32	0,67*	0,63*	0,91**	-0,06	0,67*	0,70*
Po-NaHCO <sub>3</sub>	0,76**	0,55	0,70*	0,75**	0,79**	-0,22	0,75**	0,84**
Pi-NaOH	0,36	0,69*	0,49	0,37	0,76**	-0,05	0,57	0,55
Po-NaOH	0,65*	0,67*	0,61*	0,50	0,83**	0,07	0,60	0,61*
Pi-NaOH + S	0,45	0,77**	0,59	0,77**	0,82**	-0,55	0,92**	0,89**
Po-NaOH + S	0,46	0,73**	0,77**	0,84**	0,92**	-0,50	0,92**	0,84**
Pi-HCl	0,64*	0,29	0,47	0,50	0,88**	-0,09	0,63*	0,67*
P-Residual	0,42	0,88**	0,68*	0,85**	0,80**	-0,67*	0,97**	0,94**

Significativo a \*\*  $P < 0,01$ ; \*  $P < 0,05$

#### Transformações de P no solo

O ajuste geral do modelo (Figura 3) foi considerado aceitável ( $\chi^2 = 13,21$ ,  $df = 5$ ,  $P = 0,021$ ; GFI = 0,911; CFI = 0,977; RMSEA = 0,195; AIC = 45,21). Todos os coeficientes de regressão das relações entre as frações de P foram significativos. O *Pool* Disponível (variável latente endógena) foi diretamente dependente dos *Pools* Inorgânico, Ocluso (variáveis latentes endógenas) e indiretamente do *Pool* Orgânico (variável latente exógena). O *Pool* Inorgânico apresentou efeito positivo direto e indireto através do *Pool* Ocluso  $\beta = 0,43 + (0,78 \times 0,52) = 0,84$ . O *Pool* Orgânico, apesar de não apresentar relação direta com o *Pool* disponível, teve efeito positivo indireto através dos *Pools* Inorgânico e Ocluso, com efeito geral  $\beta = 0,98 \times 0,78 \times 0,52 + 0,98 \times 0,43 = 0,82$ . Quanto à explicação geral do modelo ( $R^2$ ), o *Pool* Disponível foi explicado por 80% das variações, já os *pools* Ocluso e Inorgânico apresentaram explicação das variações de 60% e 95%, respectivamente (Figura 3).



representaram pouco do P total.

Como observado na Tabela 4, as frações orgânicas superaram as frações inorgânicas (praticamente dobraram) em todas as coberturas estudadas, pois em solos de baixa fertilidade e sem entrada de insumos externos, as formas orgânicas de P são as principais fontes de P às plantas (Gatiboni et al., 2007; Rheinheimer et al., 2008), e quanto mais pobre em P disponível for o solo, maior será a dependência pelas formas orgânicas de P (Gatiboni et al. 2008). Diversos autores estudando os solos tropicais encontraram valores médios em torno de 31% (Turner, 2006; Zaia et al., 2008; Costa et al., 2016), valores estes que estão próximos dos resultados encontrados para os cultivos sobre Argissolo Amarelo (média de 32,23%). Aleixo et al. (2016), trabalhando com solos da mesma região sob coberturas de cacau, encontraram valores compreendidos entre 32 e 40%, estando estes resultados de acordo com os aportes encontrados para os cultivos sobre Argissolo Acinzentado (média de 35,68%). O Po nos cultivos sobre Nitossolo Háplico foi em média 13,28%, sendo esse baixo teor de Po devido a maior contribuição de P-Residual (média aproximada de 80%), fração esta que apresenta considerável parcela.

A fração  $Po-NaHCO_3$  é a mais lábil entre as formas orgânicas, e apresenta menores teores em relação ao  $Po-NaOH$  (Tiessen et al., 1992; Ball-Coelho et al., 1993). A fração  $Po-NaOH$  por apresentar maior energia de ligação que a fração  $Po-NaHCO_3$ , tem maior facilidade de interação com os constituintes inorgânicos do solo, dificultando a sua mineralização e favorecendo o seu acúmulo no solo (Rheinheimer et al., 2002). A predominância do Po em relação ao Pi, principalmente as frações  $Po-NaHCO_3$  e  $Po-NaOH$ , é indicativo de que estas atuam disponibilizando P para as plantas através da ciclagem de nutrientes. O Po de moderada labilidade ( $Po-NaOH$  e  $Po-NaOH + Sonic$ ) é responsável pela reposição de P aos solos em médio prazo, sendo, em condições de baixa disponibilidade de P, convertidas em formas mais lábeis e suprir a solução do solo, garantindo o crescimento e desenvolvimento das plantas (Cunha et al., 2007; Gatiboni, et al., 2007; Santos et al., 2008; Janegitz et al., 2013).

Os solos tropicais com elevado grau de intemperismo, como é o caso do Argissolo, normalmente possuem apenas traços de  $Pi-HCl$ , uma vez que praticamente todo o P associado com material de origem (apatitas) já teria sido transformado em outras formas (Walker e Syers, 1976; Smeck, 1985), de modo

que em condições tropicais esta fração não é relevante para o suprimento das plantas e sim indicativa do grau de intemperismo destes solos. Nos solos levemente intemperizados, como os Neossolos, seu estoque pode representar 47% de P, enquanto nos solos altamente intemperizados o estoque de Pi-HCl representa em média 3% de todo o P presente nos solos (Yang e Post, 2011).

O P ocluso (representado pelas frações extraídas por NaOH + Sonic e o P-Residual) aumenta com o avanço do intemperismo, chegando a 20% do P total em solos pouco intemperizados, enquanto que em solos altamente intemperizados o estoque ocluso pode chegar a 60% (Yang e Post, 2011). O P ocluso é a forma predominante de P nos solos tropicais e subtropicais, de modo que ele é usualmente considerado de limitada disponibilidade às plantas e aos microrganismos do solo. Com isso, a principal fonte de P disponível nesses solos sob vegetação natural, sem adição de fertilizantes fosfatados, passa a ser a ciclagem do P orgânico (Johnson et al., 2003), em um ciclo muito fechado de conservação do elemento, onde as perdas ou ganhos em curto tempo são mínimas (Solomon et al., 2002; Redel et al., 2008), pois a absorção do P proveniente da decomposição da serapilheira ocorre tão rapidamente e perto das raízes que pouco deste pode ser absorvido pelos óxidos de ferro e alumínio (Vincent et al., 2010). O P-Residual pode ser fonte de fósforo para frações mais lábeis (Chen et al., 2000), contribuindo para a nutrição vegetal em situações de extrema escassez de P no solo (Guardini et al., 2012).

Os sítios 8 e 10 têm a mesma composição de espécies vegetais (sistema agroflorestal de seringueira + cacau), porém estão sob classes de solo diferentes, desta forma o sítio 10 sob solo mais fértil, Nitossolo Háplico, apresentou significativamente maiores teores de P (40,36% estoque lábil, 82,09% moderadamente lábil e 783,02% no recalcitrante) quando comparado apenas com o sítio 8 (Argissolo Acinzentado). Isso demonstra que a classe de solo tem grande importância sobre os teores de P e quando aliado a usos da terra que apresentam um alto aporte de matéria orgânica, como os sistemas agroflorestais, podem promover ganhos na disponibilidade de P para as plantas.

## Relação entre as frações de P e atributos do solo

A correlação positiva do teor de argila e a fração orgânica de moderada labilidade (Po-NaOH), indica a proteção do P pela formação de complexos argilominerais.

A maior disponibilidade de P é encontrada com o pH em torno de 6,5, desta forma, as frações lábeis não apresentaram correlação com o pH do solo. A correlação positiva entre o pH e as frações Pi-NaOH e Po-NaOH, evidencia a relação dos solos tropicais com o P ligado ao Fe e Al (Novais e Smyth, 1999), conseqüentemente, a ausência de relação entre o pH e o P mineral (P-HCl) é caracterizada pelas características dos solos estudados.

As correlações positivas entre as frações orgânicas de P com C evidenciam a dependência que o Po tem da MOS para os estoques de P no solo (Cunha et al., 2007; Turner e Engelbrecht, 2011; e Costa et al., 2016). Como o Po é originário da MOS, do tecido microbiano e dos produtos de sua decomposição (Conte et al., 2002; Martinazzo et al., 2007), esta deve ser levada em consideração em estudos sobre a disponibilidade de P para as plantas, já que o Po pode constituir de 5 a 80% do P-Total presente nos solos tropicais (Rheinheimer e Anghinoni, 2003). Nestes solos, a MOS tem grande contribuição na fertilidade, no aumento da capacidade de troca de cátions, na melhoria nas características químicas, físicas e biológicas dos solos, sendo de fundamental importância na manutenção da sustentabilidade do sistema solo-planta.

## Transformações de P no solo

O modelo estrutural das transformações de P no solo mostrou que a disponibilidade de P foi regulada pela interação entre os *Pools* Orgânico, Ocluso e Inorgânico (Figura 3). O *pool* orgânico é a principal fonte de P para o *Pool* de P disponível em solos tropicais em diversos sistemas florestais e pastagens não fertilizados (Gama-Rodrigues et al., 2014; Negassa e Leinweber, 2009), o efeito indireto via *Pool* Inorgânico evidencia que os processos de mineralização estão predominando em relação aos processos de imobilização do P, assim, as plantas estão absorvendo P diretamente do que é mineralizado sem dar chances para que o mesmo seja convertido em formas de labilidade restrita (Novais e Smyth, 1999).

Os resultados do presente estudo apontaram o *Pool* Ocluso como fonte direta de P para o *Pool* Disponível e, este efeito pode ser atribuído à contribuição da fração Po-NaOH Sonic, à dissolução de formas estáveis das formas inorgânicas de P e à mineralização das formas orgânicas mais estáveis de P encontradas na fração P-Residual. Esta mineralização das formas orgânicas da fração P-Residual tem efeito direto e positivo atuando como fonte para o *Pool* Orgânico via Po-NaHCO<sub>3</sub> (Sales et al., 2015), visto que a fração P-Residual possui considerável quantidade de Po suscetível à mineralização. Guo e Yost (1998) afirmam que a labilidade do P progride em escala temporal, de modo que em longo prazo, todo o P presente no solo possa tornar-se lábil.

A fração de Pi-HCl, como um indicador do *Pool* P mineral primário, não fez parte do modelo ajustado, provavelmente porque as classes de solo utilizadas para a modelagem apresentam elevado intemperismo, conseqüentemente apresentando pouco P oriundo do material de formação destes solos, como pode ser observado com o baixo valor desta fração na Tabela 4.

Assim, o modelo gerado neste estudo pode explicar a contribuição de cada *pool* de P do solo para o P disponível e verificar que nestas áreas, sem fertilização, todos os compartimentos de P estão agindo como fonte de P para o *Pool* disponível.

## CONCLUSÕES

A distribuição das frações de P no solo foi influenciada tanto pelo uso da terra como pela classe de solo.

Por meio das relações, infere-se que as frações de P são dependentes das características físicas e químicas do solo.

O modelo possibilitou confirmar a contribuição dos *Pools* Orgânico, Ocluso e Inorgânico sobre o *Pool* disponível de P.

O *Pool* Orgânico contribuiu de forma indireta como fonte para o *Pool* Disponível através dos *Pools* Inorgânico e Ocluso.

O *Pool* Ocluso, embora recalcitrante, atuou de forma direta para o *Pool* Disponível, indicando que as plantas podem acessar o P recalcitrante, a fim de satisfazer as suas exigências nutricionais em solos com baixo teor de P disponível.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aleixo, S., Gama-Rodrigues, A.C., Costa, M.G., Sales, M.V.S., Gama-Rodrigues, E.F., Marques, J.R.B. (2016) P transformations in cacao agroforests soils in the Atlantic forest region of Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, 1-15.
- Anderson, J.D., Ingram, J.S.I. (1996) *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. 2.ed. Wallingford, CAB International, 171p.
- Andrade, F.V., Mendonça, E.S., Alvarez V.H., Novais, R.F. (2003) Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27, 1003-1011.
- Araújo, M.S.B., Schaefer, C.E. R., Sampaio, E.V.S.B. (2004) Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latosols and Luvisols in northeastern Brazil. *Geoderma*, 119, 309-321.
- Arnhold, E. (2013) Package in the R environment for analysis of variance and complementary analyses. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*, 50(6), 488-492.
- Ball-Coelho, B., Salcedo, I.H., Tiessen, H., Stewart, J.W.B. (1993) Short- and long-term phosphorus dynamics in a fertilized ultisol under sugarcane. *Soil Science Society of America Journal*, 57(4), 1027-1034.
- Barbieri, D.M., Marques Junior, J., Alleoni, L.R.F, Garbuió, F.J., Camargo, L.A. (2009) Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. *Scientia Agricola*, 66, 819-826.
- Bowman, R.A. (1989) A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and diluted base for soil organic phosphorus. *Soil Science Society of America Journal* 53,326-366.
- Cardoso I., Janssen B., Oenema O., Kuyper T. (2003) Phosphorus pools in oxisols under shaded and unshaded coffee systems on farmers' fields in Brazil. *Agroforestry Systems*, 58(1), 55-64.

- Chen C.R., Condon L.M., Davis M.R., Sherlock R.R. (2000) Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil. *Plant Soil*, 220, 151-163.
- Condon, L.M., Goh, K.M., Newman, R.H. (1985) Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance analysis. *Journal of Soil Science*, 36(2), 199-207.
- Conte, E., Anghinoni, I., Rheinheimer, D.S. (2002) Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida pela aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26(4), 925-930.
- Costa, M.G., Gama-Rodrigues, A.C., Gonçalves, J.L.D.M., Gama-Rodrigues, E.F., Sales, M.V.D. S., Aleixo, S. (2016). Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil. *Forests*, 7(1), 15.
- Cross, A.F., Schlesinger, W.H. (1995) A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems, *Geoderma*, 64, 197-214.
- Cunha, G.M., Gama-Rodrigues, A.C., Costa, G.S. e Velloso, A.C.X. (2007) Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no norte fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 667-671.
- Dawoe, E.K., Isaac, M.E., Quashie-Sam, J. (2010) Litterfall and litter nutrient dynamics under cocoa ecosystems in lowland humid Ghana. *Plant Soil* 330(1), 55-64.
- Dick, W.A., Tabatabai, M.A. (1977) Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. *Journal of Environmental Quality*, 6, 82-85.
- Dieter D., Elsenbeer H., Turner B.L. (2010) Phosphorus fractionation in lowland tropical rainforest soils in central Panama. *Catena*, 82(2), 118-125.
- Elser, J.J., Bracken, M.E.S., Cleland, E.E., Gruner, D.S., Harpole, W.S., Hillebrand, H. Ngai, J.T., Seabloom, E.W. Shurin, J.B., Smith, J.E. (2007) Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystem. *Ecology Letters* , 10(12), 1135-1142.

- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (1999) Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa Solos, 379p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2013) Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed., 353p.
- Fontana, A., Pereira, M. G., Loss, A., Cunha, T. J. F., Salton, J. C. (2008) 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*, 14(1), 159-164.
- Fontes, A.G., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Sales, M.V.S., Costa, M.G., Machado, R.C.R. (2014) Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. *Plant Soil*, 383, 313-335.
- Frank e Harrell Jr., with contributions from Charles Dupont and many others. (2013). Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 3.12-2. <http://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>
- Gama-Rodrigues A.C., Barros N.F., Comerford N.B. (2007) Biomass and nutrient cycling in pure and mixed stands of native tree species in southeastern Bahia, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 287-298.
- Gama-Rodrigues, A.C., Sales, M.V.S., Silva, P.S.D, Comerford, N. B., Cropper, W. P., Gama-Rodrigues, E. F. (2014) An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. *Biogeochemistry*, 118, 453-469.
- Gatiboni, L.C., Kaminski, J., Rheinheimer, D.S., Flores, J.P.C. (2007) Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 691-699.
- Gatiboni, L.C., Rheinheimer, D.S., Flores, A.F.C., Anghinoni, I., Kaminski, J., Lima, M.A.S. (2005) Phosphorus forms and availability assessed by <sup>31</sup>P-NMR in successively cropped soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36, 2625-2640.
- Gatiboni, L.C., Kaminski, J., Rheinheimer, D.S., Brunetto, G. (2003) Superphosphate and rock phosphates as Phosphorus sources for grass-clover pasture on a limed acid soil in Southern Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34(17-18), 2503-2514.

- Grace, J.B., Bollen, K.A. (2008) Representing general theoretical concepts in structural equation models: the role of composite variables. *Environmental and Ecological Statistics*, 15, 191-213.
- Guardini, R., Comin, J.J., Schmitt, D.E., Tiecher, T., Bender, M.A., Rheinheimer, D.S., Mezzari, C.P., Oliveira, B.S., Gatiboni, L.C., Brunetto, G. (2012) 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*, 93(2), 215-225.
- Guerra, J.G.M., Fonseca, M.C.C., Almeida, D.J., De-Polli, H., Fernandes, M.S. (1996) Conteúdo de fósforo em amostras de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 31, 291-299.
- Guo, F., Yost, R.S. (1998) Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. *Soil Science*, 163, 822-832.
- Hair, J.R., Black, W.C., Babin, B.J., Anderson, R.E., Tatham, R.L. (2009) *Análise Multivariada de Dados*, 6. Ed. Bookman.
- Hedley, M.J., Stewart J.W.B., Chauhan B.S. (1982) Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46, 970-976.
- Iacobucci, D. (2010) Structural equations modeling: Fit Indices, sample size, and advanced topics. *Journal of Consumer Psychology*, 20, 90-98.
- Janegitz, M.C., Inoue, B.S., Rosolem, C.A. (2013) Soil phosphorus pools as affected by brachiaria and white lupin. *Ciência Rural* 43, 1381-1386.
- Johnson A.H., Frizano J., Vann D.R. (2003) Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure. *Oecologia*, 135(4), 487-499.
- Matos, E.S., Mendonça, E.S., Villani, E.M.A., Leite, L.F.C., Galvão, J.C.C. (2006) 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*, 30, 625-632.
- Martinazzo, R., Santos, D.R., Gatiboni, L.C., Brunetto, G., Kaminski, J. (2007) Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio em resposta à adição de fosfato solúvel. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(3) 563-570.

- Murphy, J., Riley, J. P. (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytical Chemistry Acta*, 27, 31-36.
- Negassa, W., Leinweber, P. (2009) How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(3), 305-325.
- Novais, R.F., Smyth, T.J. (1999) Fósforo em solo e planta em condições tropicais, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, p.399.
- Oksanen, J., Blanchet, F.G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P.R., O'Hara, R.B., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H.H., Szoecs, E., Wagner, H. (2016). *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.4-0. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Pavinato, P.S., Dao, T., Rosolem, C.A. (2010) Tillage and phosphorus management effects on enzyme-labile bioactive phosphorus availability in Cerrado Oxisols. *Geoderma*, 156(3-4) 207-215.
- Pereira, M.F., Loss, A., Beutler, S.J., Torres, J.L.R. (2010) Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45(5) 508-514.
- R Core Team (2016). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>
- Raij, B. van. (2004) Fósforo no solo e interação com outros elementos. In: Yamada, T., Abdalla, S.R.S. (Ed.). *Fósforo na agricultura brasileira*. Piracicaba: Potafos/Anda, 2004. p. 107-116.
- Redel, Y. D., Rubio, R., Borie, F. (2008) Phosphorus fractions and phosphatase activity in an Andisol under different forest ecosystems. *Geoderma*. 145, 216-221.
- Richter, D.D., Allen, H.L., Li, J., Markewits, D., Raikes, J. (2006) Bioavailability of slowly cycling soil phosphorus: major restructuring of soil P fractions over four decades in an aggrading forest. *Oecologia*, 150, 259-271.
- Rheinheimer, D.S, Anghinoni, I. (2003) Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34, 2339-2354.

- Rheinheimer, D. S., Gatiboni, L. C., Kaminski, J. (2008) Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema de plantio direto. *Ciência Rural*, 38 (2), 576-586.
- Sales, M.V.S., Gama-Rodrigues, A.C., Comerford, N.B., Cropper, W.P., Gama-Rodrigues, E.F., Oliveira, P.H.G. (2015) Respecification of structural equation models for the P cycle in tropical soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 102(3), 347-358.
- Santos, D.R., Gatiboni, L.C., Kaminski, J. (2008) Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, 38(2), 576-586.
- Sato, S., Comerford, N.B. (2005) Influence of soil pH on inorganic phosphorus sorption and desorption in a humid brazilian ultisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29(5), 685-694.
- Schermelleh-Engel, K., Moosbrugger, H., Müller, H. (2003) Evaluating the fit of structural equation models: tests of significance and descriptive goodness-of-fit measure. *Methods of Psychological Research Online*, 8(2), 23-74.
- Smeck, N.E. (1985) Phosphorus dynamics in soils and landscapes. *Geoderma*, 36(2) 185-189.
- Solomon, D., Lehmann, J., Mamo, T., Fritzche, F., Zech, W. (2002) Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands. *Geoderma*. 105, 21-48.
- Stutter, M.I., Shand, C. A., George, T.S., Blackwell, M.S.A., Dixon, L., Bol, R., Mackay, R.L., Richardson, A.E., Condon, L.M., Haygarth, P.M. (2015) Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils. *Geoderma*, 257(1-3), 29-39.
- Tiessen, H., Salcedo, I.H., Sampaio, E.V.S.B. (1992) Nutrients and soil organic matter dynamic under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environments*, 38, 139-159.
- Tirloni, C., Vitorino, A.C.T., Novelino, J.O., Tirloni, D., Coimbra, D.S. (2009) Disponibilidade de fósforo em função das adições de calagem e de um bioativador do solo. *Ciência e Agrotecnologia*, 33, 977-984.
- Turner, B.L. (2006) Organic phosphorus in Madagascan rice soils. *Geoderma*, 136, 279–288.

- Turner, B. L. (2008) Soil organic phosphorus in tropical forests: an assessment of the NaOH – EDTA extraction procedure for quantitative analysis by solution  $^{31}\text{P}$  NMR spectroscopy. *European Journal of Soil Science*, 59, 453-466.
- Turner, B.L., Engelbrecht, B.M.J. (2011) Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests. *Biogeochemistry*. 103, 297-315.
- Vincent, A.G., Turner, B.L., Tanner, E.V.J. (2010) Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist Forest. *European Journal of Soil Science*, 61, 48-57.
- Walker, T.W., Syers, J.K. (1976) The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15, 01-19.
- Yang, X., Post, W.M. (2011) Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. *Biogeosciences*. 8, 2907-2916.
- Zaia, F.C., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F. (2008) Formas de fósforo no solo sob leguminosas florestais, floresta secundária e pastagem no Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1191-1197.

### 3.2 ESTOQUE DE FÓSFORO ORGÂNICO DO SOLO SOB DIFERENTES USOS DA TERRA NA REGIÃO SUL DA BAHIA

#### RESUMO

Os solos tropicais apresentam alta capacidade de adsorção do P no solo, devido ao elevado grau de intemperismo e acidez. Sob essas condições, o Po pode representar uma importante fonte de P às plantas em sistemas sem o incremento da adubação. As análises de rotina para determinação de P no solo levam em consideração apenas o Pi na solução do solo, desprezando o Po. O objetivo deste trabalho foi avaliar o estoque total de P através da utilização de duas metodologias distintas, com ênfase no Po total em diferentes sistemas de uso da terra. As frações de P foram extraídas através do método de ignição e do método de extração com NaOH + EDTA. Os resultados mostraram que o sistema de seringueira + cacau cultivado sobre Nitossolo Háplico apresentou os maiores estoques de P-Total ( $2.060,11 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $2.235,04 \text{ kg ha}^{-1}$ , método por ignição e método NaOH + EDTA, respectivamente). O estoque médio de Po na profundidade de 0-100 cm foi de  $1.165,96 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $1.398,53 \text{ kg ha}^{-1}$  (método por ignição e método NaOH + EDTA, respectivamente). Quando avaliado o Po em diferentes profundidades do solo, observa-se que em todas as profundidades os sistemas apresentaram diferenças significativas entre si independente do método utilizado, a maior proporção de P-total foi extraída na profundidade de 0-40 cm (até 72% aproximadamente), enquanto que menos de 42% foi extraído a partir de 40-100 cm de profundidade. Os maiores estoques de Po foram encontrados nos sistemas agroflorestais (SAF's) para todas as profundidades independente do método, e estes quando sobre Nitossolo apresentaram um aporte de até 30%

superior em relação aos SAF's sobre Argissolo. A distribuição das frações de Po no solo foi influenciada tanto pelo uso da terra quanto pelo método de extração com NaOH + EDTA (extração em meio básico), que apresentou maior poder de extração de P no solo para as condições estudadas.

Palavras-chave: Sistemas de uso da terra; Método de ignição; Método de extração com NaOH + EDTA.

### ABSTRACT

Tropical soils have high adsorption capacity of P in the soil due to the high degree of weathering and acidity. Under these conditions, Po may represent an important source of P to plants in systems without increasing fertilization. Routine analyzes for P determination in soil take into account only the Pi in the soil solution by neglecting the Po. The aim of the present work was to evaluate the total P stock through the use of two different methodologies, with emphasis on total Po in different soil use systems and soil classes. The P fractions were extracted using the ignition method and the NaOH + EDTA extraction method. The results showed in the system of rubber tree + cocoa cultivated on Nitossolo Háplico presented the largest stocks of P-total (2.060,11 kg ha<sup>-1</sup> and 2.235,04 kg ha<sup>-1</sup>), method by ignition and NaOH + EDTA method respectively. The average content of the total Po fraction in the 0-100 cm depth was 1.165,96 kg ha<sup>-1</sup> and 1.398,53 kg ha<sup>-1</sup> (ignition method and NaOH + EDTA method, respectively). When Po was evaluated at different depths of the soil, it was observed that at all depths the systems showed significant differences between them, independent of the method used, the highest proportion of Po was extracted at depth of 0-40 cm (up to 72% approximately), while less than 42% was extracted from 40-100 cm deep. The highest levels of Po were found in the Agroforestry systems (SAF's) for all depths independent of the method, and when on Nitossols presented a contribution of up to 30% in relation to the SAF's on Argisol. The methods used allowed to evaluate the total Po stock in the soil, which can not be observed in a routine fertility analysis, besides evidencing the potential of Po, as a source of P to the plants.

Keywords: Agroforestry systems; Ignition method; Extraction method with NaOH + EDTA.

## INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um dos nutrientes essenciais para a sobrevivência das plantas, é um macronutriente essencial exigido em menor quantidade pelas plantas (Raij, 1991), porém é considerado como um dos nutrientes mais limitantes à produtividade das culturas e à produção florestal (Turner e Engelbrecht, 2011), especialmente em regiões tropicais (Elser et al., 2007; Yang e Post, 2011).

Os solos das regiões tropicais são, em sua maioria, ácidos e apresentam intenso intemperismo, o que promove redução da fração de P disponível, quase sempre abaixo das exigências mínimas das culturas. A deficiência de P ocorre mesmo quando o teor total é elevado, devido à alta capacidade que esses solos têm em reter o P na fase sólida do solo (Santos et al., 2008b), resultando em baixos teores de P na solução do solo, prontamente disponíveis para as plantas (Rolim Neto et al., 2004; Aray e Sparks, 2007; Novais et al., 2007; Shen et al., 2011). Em sistemas agroflorestais (SAF's) e florestais sem o incremento da adubação fosfatada e cultivados sob solos tropicais, o Po é a principal fonte do nutriente para as plantas (Cross e Schilesinger, 1995; Cunha et al., 2007; Vincent et al., 2010) através da decomposição e mineralização da fração lábil de Po (Po lábil), que é facilmente mineralizada, contribuindo com a disponibilidade de P para as plantas (Santos et al., 2008a).

O fósforo orgânico (Po) é formado pelos íons fosfatos, associados diretamente à matéria orgânica do solo (MOS) (Gatiboni et al., 2008), a decomposição de resíduos e a mineralização do Po são capazes de fornecer P em quantidades consideráveis às plantas (Guerra et al., 1996; Cunha et al., 2007), por reduzir os efeitos do processo de adsorção de P inorgânico pela fase mineral do solo, melhorando a disponibilidade de P no solo (Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008b). Os resíduos vegetais na superfície do solo constituem importante reserva de nutrientes, cuja disponibilização pode ser rápida e intensa,

ou lenta e gradual, pois as espécies vegetais apresentam diferenças em sua composição química, modificando a velocidade de decomposição e a liberação de nutrientes para o solo (Fernandes et al., 2006).

O Po pode ser afetado pela mudança da cobertura vegetal, alterando a disponibilidade de P, como observado por Zaia et al. (2008), onde na camada de 0-10 cm as coberturas acácia, sabiá, pasto e capoeira apresentaram, respectivamente, teor médio de Po de 210,30 mg kg<sup>-1</sup>, 148,47 mg kg<sup>-1</sup>, 152,34 mg kg<sup>-1</sup> e 106,49 mg kg<sup>-1</sup> para . O Po é de grade relevância aos solos tropicais, pois atua ativamente na disponibilidade do P às plantas (Cross e Schlesinger, 1995) e deve ser levado em consideração em estudos envolvendo a sua dinâmica e biodisponibilidade.

Nas regiões tropicais, o P orgânico representa, em média, de 22% (Zaia et al., 2008b; Rita et al., 2013) a aproximadamente 30% (Guerra et al., 1996; Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008a) do P total do solo. Mesmo não representando a maior porção do P total do solo, a fração orgânica de P geralmente constitui a maior parte do P lábil total nos solos tropicais (Guerra et al., 1996; Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008a,b).

Embora existam muitos trabalhos com abordagens sobre o Po em diferentes sistemas de uso da terra ao longo do perfil do solo (Tokura et al., 2002; Nogueira et al., 2008; Dieter et al., 2010; Zaia et al., 2012; Bezerra et al., 2015), sua natureza química e a sua dinâmica no solo permanecem mal compreendidas. Apesar da importância do Po do solo, particularmente em sistemas não fertilizados, onde o mesmo é a principal fonte de P-disponível para as plantas, suas formas não são quantificadas pelas análises químicas de rotina e são desconsideradas, já que não existem métodos diretos para quantificar o Po do solo (Turner et al., 2005). Os métodos de avaliação da fertilidade do solo enfocam a fração inorgânica lábil de P como indicadora da disponibilidade deste nutriente para as culturas e geralmente são utilizados para estimar a necessidade de adubação fosfatada, apesar da fração orgânica contribuir significativamente para o fornecimento de P às plantas (Novais e Smith, 1999).

Partindo do princípio de que o poder de extração dos métodos analíticos utilizados para determinação do reservatório de P no solo pode ser variável em função das características de cada solo e, que o estoque de Po no perfil do solo pode ser influenciado pelos diferentes sistemas de usos da terra, o objetivo deste

trabalho foi: (1) avaliar qual metodologia proporciona maior recuperação de Po; (2) avaliar a variação do Po nas diferentes camadas do solo; (3) avaliar o efeito dos diferentes sistemas de uso da terra sobre a distribuição do Po do solo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Caracterização da área e amostragem do solo

As áreas de estudo estão localizadas na Estação Experimental Djalma Bahia (EDJAB), no município de Una (15° 16' S, 30° 4' W), e no Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC), situado na sede da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), no município de Ilhéus (14° 47' S 39° 02' W), no Sul do Estado da Bahia, Brasil. O clima da região é AF (Köppen), com pluviosidade média de 2.000 mm e temperatura média de 25 °C.

Três classes de solo foram selecionadas, sendo estas o Argissolo Amarelo, o Argissolo Acinzentado e o Nitossolo Háplico, classificados de acordo com Embrapa (2013). Foram avaliados 11 sítios, que estão descritos na Tabela 1.

As amostras de solo foram coletadas em abril de 2012, início do período chuvoso da região. Na parte central de cada sistema, foram delimitadas quatro parcelas de 30 m<sup>2</sup> distantes entre si por aproximadamente 100 m, onde foi aberta uma trincheira de 1 x 1 x 1,5 m, entre as linhas das culturas. Em cada trincheira o solo foi coletado em seis camadas (0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60- 80 e 80-100 cm) de profundidade, totalizando 24 amostras por área. Após a coleta, as amostras foram identificadas e acondicionadas em sacos plásticos, sendo, em seguida, transportadas para o laboratório, secas ao ar e peneiradas a 2 mm de malha, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA).

Amostras indeformadas coletadas em anéis volumétricos de 100 cm<sup>3</sup> foram utilizadas para a determinação da densidade do solo nas cinco profundidades estudadas (Embrapa, 1997), sendo os valores utilizados para o cálculo do estoque de fósforo. As amostras deformadas da camada de profundidade 0-10 cm foram utilizadas para análise granulométrica do solo, através do método da pipeta, e para as análises químicas.

Tabela 1. Descrição dos diferentes sítios selecionados incluindo as diferentes classes de solos.

Solo	Sítio	Sítio	Idade (anos)	Forma de manejo
Argissolo Amarelo	1	Floresta natural	-	Fragmento de Mata Atlântica
	2	Pastagem	30	<i>Brachiaria decumbens</i> , antes da instalação a área passou por período de abandono com predomínio de plantas daninhas
	3	Seringueira (monocultura)	35	Plantios puros de seringueira com espaçamento de 7x3 m (476 plantas ha <sup>-1</sup> )
Argissolo Acinzentado	4	Floresta natural	-	Fragmento de Mata Atlântica
	5	Pastagem	8	<i>Brachiaria decumbens</i> em substituição à floresta natural
	6	Seringueira (monocultura)	40	Plantios puros de seringueira com espaçamento de 7x3 m (476 plantas ha <sup>-1</sup> )
	7	Seringueira + Açai	30	Seringueira ( <i>Hevea brasiliensis</i> ) + açai ( <i>Euterpe oleraceae</i> ): fileira simples com espaçamento de 7x3 m para a seringueira e para o açai (476 plantas ha <sup>-1</sup> de seringueira e 476 plantas ha <sup>-1</sup> de açai)
	8	Seringueira + Cacau	35	Seringueira + cacau ( <i>Theobroma cacao</i> ): espaçamento 15x3 m para a seringueira entre fileira dupla de cacau com espaçamento de 3x3 m (222 plantas ha <sup>-1</sup> de seringueira e 1100 plantas ha <sup>-1</sup> de cacau)
Nitossolo Háptico	9	Cacau + Eritrina	30	<i>Erythrina (Erythrina glauca</i> Lour.) com espaçamento de 25x25 m, árvores de cacau com espaçamento de 3x3 m
	10	Seringueira + Cacau	8	Seringueira + cacau ( <i>Theobroma cacao</i> ): espaçamento 15x3 m para a seringueira entre fileira dupla de cacau com espaçamento de 3x3 m (222 plantas ha <sup>-1</sup> de seringueira e 1100 plantas ha <sup>-1</sup> de cacau)
	11	Seringueira + Cupuaçu	30	Seringueira + cupuaçu ( <i>Theobroma grandiflorum</i> (Willd. ex Spreng.) K. Schum.): com espaçamento 7x3 m para a seringueira e para o cupuaçu (476 plantas ha <sup>-1</sup> de seringueira e 476 plantas ha <sup>-1</sup> de cupuaçu)

## Análise física e química do solo

O C orgânico total foi determinado por oxidação com  $K_2Cr_2O_7$   $1,25 \text{ mol L}^{-1}$  em meio ácido (Anderson e Ingram, 1996) e N total pelo método Kjeldahl. Os demais atributos químicos foram determinados de acordo com EMBRAPA (1999). O pH foi mensurado com um eletrodo de vidro em suspensão de solo em água deionizada; a granulometria foi realizada pelo método da pipeta. Ca, Mg e Al trocáveis foram extraídos com 1 M KCl, K foi extraído com Mehlich-1 e as concentrações de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Al^{3+}$  nos extratos foram determinadas por espectrofotômetro de absorção atômica e as concentrações de K foram determinadas por espectrofotômetro de emissão de chama. Na determinação da acidez potencial (H + Al), foram utilizados  $5,0 \text{ cm}^3$  de TFSA e 75 mL da solução de  $Ca(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 7,0, em erlenmeyer de 125 mL, 25 ml do sobrenadante foi titulado com NaOH 0,025N. A soma de bases (SB) se deu através da fórmula:  $Ca^{2+} + K^+ + Mg^{2+}$  e a capacidade de troca de cátions a pH 7 (CTC) através da fórmula:  $Ca^{2+} + K^+ + Mg^{2+} + (H^+ + Al^{3+})$ . O percentual de saturação de bases foi determinado através da fórmula:  $(SB / CTC) \times 100$ . O fósforo total foi determinado como proposto por Hedley et al. (1982) com a digestão em  $H_2SO_4 + H_2O_2$  de 0,1 g de solo seco e macerado. Os resultados das análises físicas e químicas dos solos encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades físicas e químicas dos solos na camada de 0-10 cm sob diferentes usos da terra e classes de solo na Região Sul da Bahia.

Propriedades	<sup>a</sup> Sítios										
	Argissolo Amarelo			Argissolo Acinzentado				Nitossolo Háptico			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	115,6	91,4	237,4	456,9	426,4	483,8	489,5	573,0	523,6	562,5	416,1
pH	4,20	4,12	3,84	4,52	4,34	3,68	3,37	3,53	5,60	5,72	5,53
C total (g kg <sup>-1</sup> )	21,60	10,20	9,50	25,60	20,90	15,90	21,40	19,60	21,50	37,80	21,60
N total (g kg <sup>-1</sup> )	1,11	0,78	0,85	2,19	1,18	1,03	1,18	1,28	2,18	3,01	2,02
<sup>b</sup> P total (mg kg <sup>-1</sup> )	657,9	712,4	603,1	616,1	619,2	645,9	905,2	998,5	2939,3	4310,2	2774,7
K <sup>+</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	29,67	63,67	7,50	25,00	34,00	19,00	25,33	24,67	29,67	34,67	41,00
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,87	1,03	0,13	0,13	1,37	0,20	0,40	0,50	4,30	13,43	8,53
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,37	0,50	0,10	0,40	0,50	0,20	0,20	0,50	3,03	4,70	2,80
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,70	0,40	0,70	1,20	0,40	1,40	1,90	1,40	0,10	0,00	0,00
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,32	1,69	0,25	0,59	1,96	0,45	0,67	1,06	7,41	18,30	11,44
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,92	5,82	2,42	3,89	11,26	7,68	6,87	8,83	17,88	23,50	18,44
V (%)	26,83	29,04	10,33	15,17	17,41	5,86	9,75	12,00	41,44	77,87	62,04

<sup>a</sup>Sítios: 1: Floresta Natural; 2: Pastagem; 3: Seringueira (monocultura); 4: Floresta Natural; 5: Pastagem; 6: Seringueira (monocultura); 7: Seringueira + Açaí; 8: Seringueira + Cacau; 9: Cacau + Eritrina; 10: Seringueira + Cacau; 11: Seringueira + Cupuaçu. Os sítios listados de 1 a 3 são cultivados sobre Argissolo Amarelo; de 4 a 8 são cultivados sobre Argissolo Acinzentado; de 9 a 11 são cultivados sobre Nitossolo Háptico. <sup>b</sup>P total foi extraído por digestão H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Amostras (TFSA) das seis camadas foram utilizadas para a determinação das frações de P. O P-Disponível foi determinado utilizando o método de extração Melich-1 e pela resina trocadora de ânions. A estimativa do Po total foi realizada pelo método de ignição do solo a 550°C por 2 horas, com posterior extração com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>, sendo a quantidade de P orgânico obtida pela diferença entre o P extraído da amostra ignificada e a não ignificada (Olsen e Sommers, 1982).

Outra estimativa do Po também foi realizada utilizando a metodologia descrita por Turner e Engelbrecht (2011), utilizando a solução extratora de NaOH 0,25 M + Na<sub>2</sub>EDTA 50 mM. O teor de Pi no extrato foi determinado pelo método do molibdato-ácido ascórbico (Murphy e Riley, 1962) e o teor de P-total foi analisado pelo método colorimétrico de Dick e Tabatabai (1977) após digestão. O teor de Po foi obtido pela diferença entre o P-total e o Pi.

O estoque de fósforo do solo foi estimado através da multiplicação da espessura (cm), teor de fósforo (mg kg<sup>-1</sup>) e densidade do solo (g dm<sup>-3</sup>), conforme a equação:

$$\text{Estoque de P (kg ha}^{-1}\text{)} = E \text{ (cm)} \times P \text{ (mg kg}^{-1}\text{)} \times \text{densidade (g cm}^{-3}\text{)} \times 0,1.$$

#### Análise de dados

Cada sítio foi considerado um tratamento de efeito-fixo devido a diversas fontes de variação, tais como cinco composições de sistemas agroflorestais, dois monocultivos de seringueira, duas florestas naturais e duas pastagens. Adotou-se a pseudorrepetição para as quatro parcelas fixas de cada sítio como em outros estudos recentes em sistemas florestais e agroflorestais (Dawoe et al., 2010; Fontes et al., 2014). Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade (Bartlett). Atendendo as pressuposições de normalidade e homogeneidade foi realizada a análise de variância (ANOVA). A Correlação de Pearson foi realizada entre as duas metodologias de extração de Po (n=66), através do programa R 3.2.1 (R Core Team, 2016) e pacote Hmisc (Frank e Harrell, 2013). O teste de média Scott-Knot em 5% de probabilidade foi utilizado a fim de gerar o agrupamento das médias entre os sítios avaliados, realizadas através do programa R 3.2.1 (R Core Team, 2016) e o pacote “easyanova” (Arnhold, 2013). A análise de regressão e

para a construção dos gráficos foi usado o programa SIGMAPLOT 12.0 (Systat Software inc.).

## RESULTADOS

### Métodos de determinação de Po no solo

O método de extração NaOH + EDTA apresentou maior poder de extração para as frações de P em relação ao método de ignição para todas as profundidades estudadas (Tabelas 3, Figura 1 e 3). Na profundidade de 0-100 cm, o método com NaOH + EDTA apresentou média geral superior em 5,13%, 2,68% e 16,63% para o P-Total, Pi e Po, em relação ao método de ignição na profundidade de 0-100 cm. A correlação na profundidade de 0-100 cm entre os dois métodos utilizados nesse trabalho foi altamente significativa ( $r=0,99$ ,  $p<0,001$ ) (Figura 2).

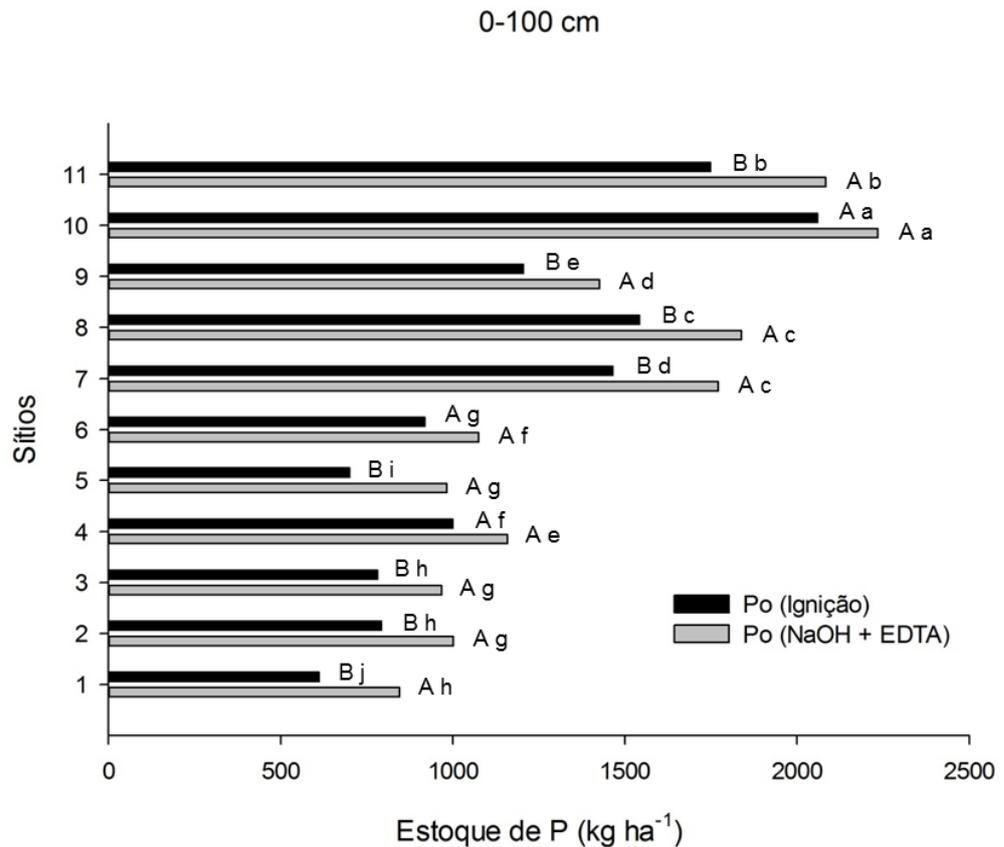


Figura 1. Estoque de Po do solo na profundidade de 0-10 cm, sobre diferentes sistemas de uso da terra na Região Sul da Bahia, Brasil, obtidos com dois métodos (ignição e NaOH + EDTA). Letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste t em 5% de probabilidade entre os métodos em cada sítio. Letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente pelo teste Scott-Knott em 5% de probabilidade em cada método. Sítios: 1: Pasto; 2: Floresta Natural; 3: Seringueira (monocultura); 4: Pasto; 5: Floresta Natural; 6: Seringueira (monocultura); 7: Seringueira + Açai; 8: Seringueira + Cacau; 9: Cacau + Eritrina; 10: Seringueira + Cacau; 11: Seringueira + Cupuaçu. Os sítios listados de 1 a 3 são cultivados sobre Argissolo Amarelo; de 4 a 8 sobre Argissolo Acinzentado; de 9 a 11 sobre Nitossolo Háplico.

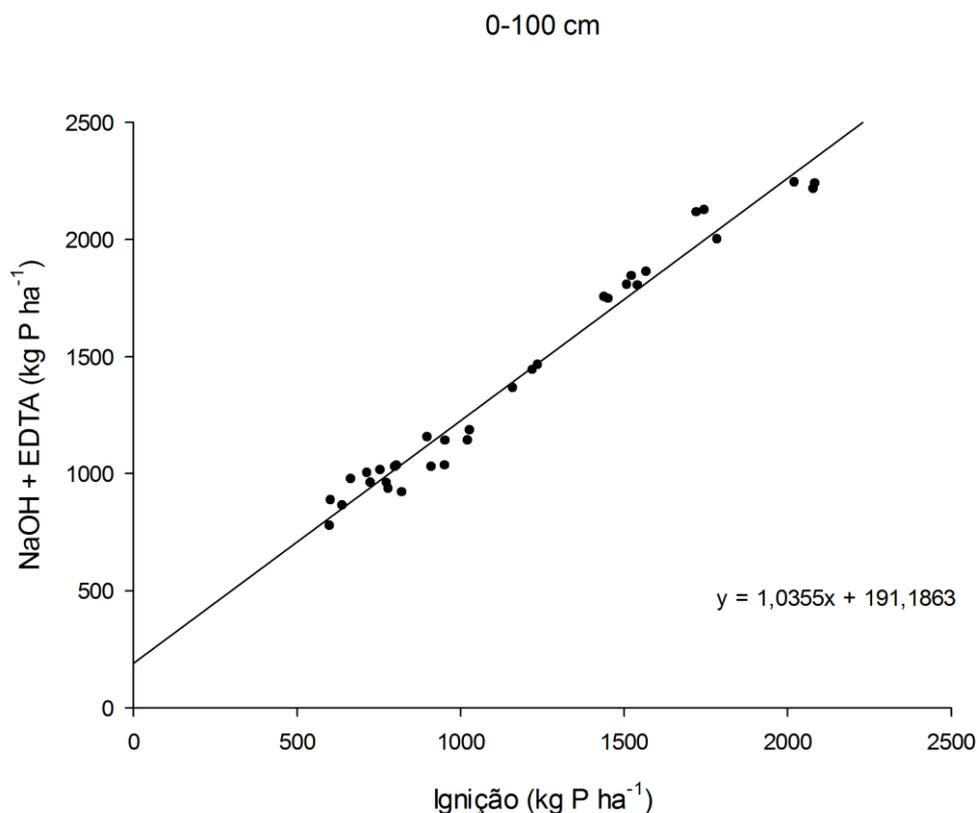


Figura 2. Análise de regressão linear simples que estima os teores de Po (kg ha<sup>-1</sup>) na profundidade de 0-100 cm utilizando o método de extração por ignição e com NaOH + EDTA nos 11 sítios avaliados.

Na camada de 0-20 cm o poder de extração do método NaOH + EDTA variou entre 4,69% e 21,82% em relação ao método por ignição, os extremos foram representados pelos sítios Seringueira + cacau sobre Nitossolo Háplico e Floresta Natural sobre Argissolo Acinzentado, respectivamente. Na camada seguinte o comportamento foi semelhante, onde o poder de extração do método variou entre 5,56% e 30,36% (sítios Seringueira + cacau sobre Nitossolo Háplico e Floresta Natural sobre Argissolo Acinzentado, respectivamente) (Figura 3).

Nas camadas mais inferiores (a partir de 40 cm) a variação entre os métodos utilizados foi maior, chegando a 50,96% e 63,10% nas camadas de 40-60 cm e 60-80 cm no sítio Pasto sobre Argissolo Amarelo e, 70,40% na camada 80-100 cm no sítio Floresta Natural sobre Argissolo Amarelo (Figura 3).

## Estoque de Po no solo

Os resultados para o estoque de P-total na profundidade de 0-100 cm para as metodologias utilizadas no presente estudo encontram-se na Tabela 3. O estoque de P-total variou significativamente entre os sítios estudados, onde o maior estoque foi encontrado no sistema de seringueira + cacau sobre Nitossolo Háplico (19.581,18 kg ha<sup>-1</sup> e 19.971,46 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e método NaOH + EDTA, respectivamente) e o menor estoque foi encontrado na floresta natural sobre Argissolo Acinzentado (3.122,39 kg ha<sup>-1</sup> e 3.488,46 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e método NaOH + EDTA, respectivamente). O estoque de Pi apresentou o mesmo comportamento, onde o maior estoque foi encontrado no sistema de seringueira + cacau sobre Nitossolo Háplico (17.521,07 kg ha<sup>-1</sup> e 17.736,43 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e método NaOH + EDTA, respectivamente) e o menor estoque foi encontrado na floresta natural sobre Argissolo Acinzentado (2.422,83 kg ha<sup>-1</sup> e 2.506,22 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente).

Os resultados para o estoque de Po na profundidade de 0-100 cm encontram-se na Tabela 3. O SAF seringueira + cacau cultivado sobre Nitossolo Háplico apresentou estoque de P significativamente superior (2.060,11 kg ha<sup>-1</sup> e 2.235,04 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente), seguido pelos SAF's: seringueira + cupuaçu (1.749,32 kg ha<sup>-1</sup> e 2.083,73 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente), seringueira + cacau cultivado sobre Argissolo Amarelo (1.542,83 kg ha<sup>-1</sup> e 1.838,92 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente), seringueira + açaí ( 1.465,07 kg ha<sup>-1</sup> e 1.771,22 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente) e cacau + eritrina ( 1.204,07 kg ha<sup>-1</sup> e 1.426,77 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente) (Tabela 3). O pasto sobre Argissolo Amarelo apresentou as menores médias para ambas as metodologias (611,92 kg ha<sup>-1</sup> e 844,59 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente).

Tabela 3. Estoque de P do solo, na profundidade 0-100 cm, sobre diferentes sistemas de uso do solo e dois métodos de extração na região Sul da Bahia, Brasil.

Sítios <sup>a</sup>	Estoque de P (kg ha <sup>-1</sup> )					
	Ignição			NaOH + EDTA		
	Pt	Pi	Po	Pt	Pi	Po
1	3.496,71h	2.884,80g	611,92j	3.859,46h	3.014,87g	844,59h
2	3.925,48f	3.132,61f	792,87h	4.295,42f	3.293,92f	1.001,50g
3	3.398,99i	2.617,77j	781,22h	3.880,00h	2.913,53h	966,47g
4	3.782,33g	2.782,59i	999,74f	4.059,40g	2.901,13h	1.158,27e
5	3.122,39j	2.422,83k	699,56i	3.488,46i	2.506,22i	982,25g
6	3.766,51g	2.847,69h	918,81g	4.058,55g	2.983,45g	1.075,10f
7	5.713,97e	4.248,91e	1.465,07d	6.119,20e	4.347,98e	1.771,22c
8	6.266,07d	4.723,25d	1.542,83c	6.711,38d	4.872,46d	1.838,92c
9	13.091,43c	11.887,36c	1.204,07e	13.686,14c	12.259,38c	1.426,77d
10	19.581,18a	17.521,07a	2.060,11a	19.971,46a	17.736,43a	2.235,04a
11	17.024,84b	15.275,51b	1.749,32b	17.536,03b	15.452,30b	2.083,73b
Média Geral	7.560,90	6.394,94	1.165,96	7.969,59	6.571,06	1.398,53
CV (%)	0,40	0,29	2,71	0,60	0,41	3,36

Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Scott-Knott em 5% de probabilidade. \*Sítios: 1: Pasto; 2: Floresta Natural; 3: Seringueira (monocultura); 4: Pasto; 5: Floresta Natural; 6: Seringueira (monocultura); 7: Seringueira + Açaí; 8: Seringueira + Cacau; 9: Cacau + Eritrina; 10: Seringueira + Cacau; 11: Seringueira + Cupuaçu. Os sítios listados de 1 a 3 são cultivados sobre Argissolo Amarelo; de 4 a 8 sobre Argissolo Acinzentado; de 9 a 11 sobre Nitossolo Háplico.

A maior proporção de P-total foi extraída na profundidade de 0-40 cm, variando de 69% a 87% no método por ignição e de 67% a 79% no método de extração com NaOH + EDTA. Os maiores teores de P-total foram encontrados nos SAF's para todas as profundidades independente do método, e estes quando sobre Nitossolo apresentaram um aporte de até 30% superior em relação aos SAF's cultivados sobre Argissolo. O Pi, em todos os sistemas de uso da terra, independente da classe de solo ao longo do perfil, chegou a representar 90% do P-total presente no solos.

Quando avaliado o Po nas diferentes camadas do solo, observa-se que em todas as profundidades os sistemas apresentaram diferenças significativas entre si (Figura 3). Na profundidade de 0-20 cm as maiores médias apresentadas foram observadas no sistema agroflorestal seringueira + cacau sobre Nitossolo Háplico (997,02 kg ha<sup>-1</sup> e 1046,04 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente), que diferiu significativamente dos demais sistemas, seguido

pelos SAF's que apresentaram médias intermediárias - seringueira + cupuaçu (722,09 kg ha<sup>-1</sup> e 823,10 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente), seringueira + cacau sobre Argissolo Acinzentado (682,34 kg ha<sup>-1</sup> e 777,12 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente), seringueira + açaí (724,81 kg ha<sup>-1</sup> e 781,03 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente) e cacau + eritrina (578,55 kg ha<sup>-1</sup> e 681,8 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente) (Figura 1). A floresta natural sobre Argissolo Amarelo apresentou as menores médias (355,52 kg ha<sup>-1</sup> e 426,76 kg ha<sup>-1</sup>, método por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente).

Na profundidade de 20-40 cm, as maiores médias foram encontradas no SAF seringueira + cupuaçu (499,66 kg ha<sup>-1</sup> e 577,30 kg ha<sup>-1</sup>, métodos por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente), que diferiu significativamente dos demais sistemas. Os SAF's seringueira + cacau sobre Nitossolo Háplico e seringueira + cacau sobre Argissolo Acinzentado não diferiram entre si para o método NaOH + EDTA, porém diferiram para o método de ignição. Os SAF's seringueira + açaí e cacau + eritrina não apresentaram diferenças significativas entre si nos métodos trabalhados, bem como alguns sistemas sobre Argissolo Acinzentado (Seringueira, floresta natural e pasto) e, o pasto sobre Argissolo Amarelo (Figura 3). Na profundidade de 40-60 cm, as maiores médias foram encontradas no SAF seringueira + cupuaçu (272,91 kg ha<sup>-1</sup> e 345,94 kg ha<sup>-1</sup>, métodos por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente), que diferiu significativamente dos demais sistemas, seguido dos SAF's seringueira + cacau sobre Nitossolo Háplico e sobre Argissolo Acinzentado e, seringueira + açaí em que as médias ficaram agrupadas nestes sistemas, em ambos os métodos. Os demais sistemas não diferiram para o método NaOH + EDTA, mas diferiram para o método de ignição (Figura 3).

Na profundidade de 60-80 cm, as maiores médias apresentadas foram observadas no SAF seringueira + cacau sobre Nitossolo Háplico (218,91 kg ha<sup>-1</sup> e 245,00 kg ha<sup>-1</sup>, métodos por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente), não diferindo estatisticamente do SAF seringueira + cupuaçu para o método NaOH + EDTA. As médias dos SAF's seringueira + cacau sobre Argissolo Acinzentado e seringueira + açaí ficaram agrupadas para o método NaOH + EDTA (176,24 e 153,02 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente), mas diferiram para o método de ignição (1,44 kg ha<sup>-1</sup> e 1,14 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Seguido dos sítios seringueira + cacau sobre Nitossolo Háplico, pasto sobre Argissolo Acinzentado e seringueira sobre

Argissolo Amarelo em que as médias ficaram agrupadas para os 2 métodos e, dos sítios pasto e floresta natural sobre Argissolo Amarelo e floresta natural e seringueira sobre Argissolo Acinzentado em que as médias também se agruparam (Figura 3).

Na profundidade de 80-100 cm, o SAF seringueira + cacau sobre Nitossolo Háplico apresentou as maiores médias ( $141,02 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $171,02 \text{ kg ha}^{-1}$ , métodos por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente), tendo chegado a uma diferença de aproximadamente 89% e 93% pelos métodos por ignição e NaOH + EDTA, respectivamente, quando comparado ao pasto sobre Argissolo Amarelo, que apresentou as menores médias (Figura 3).

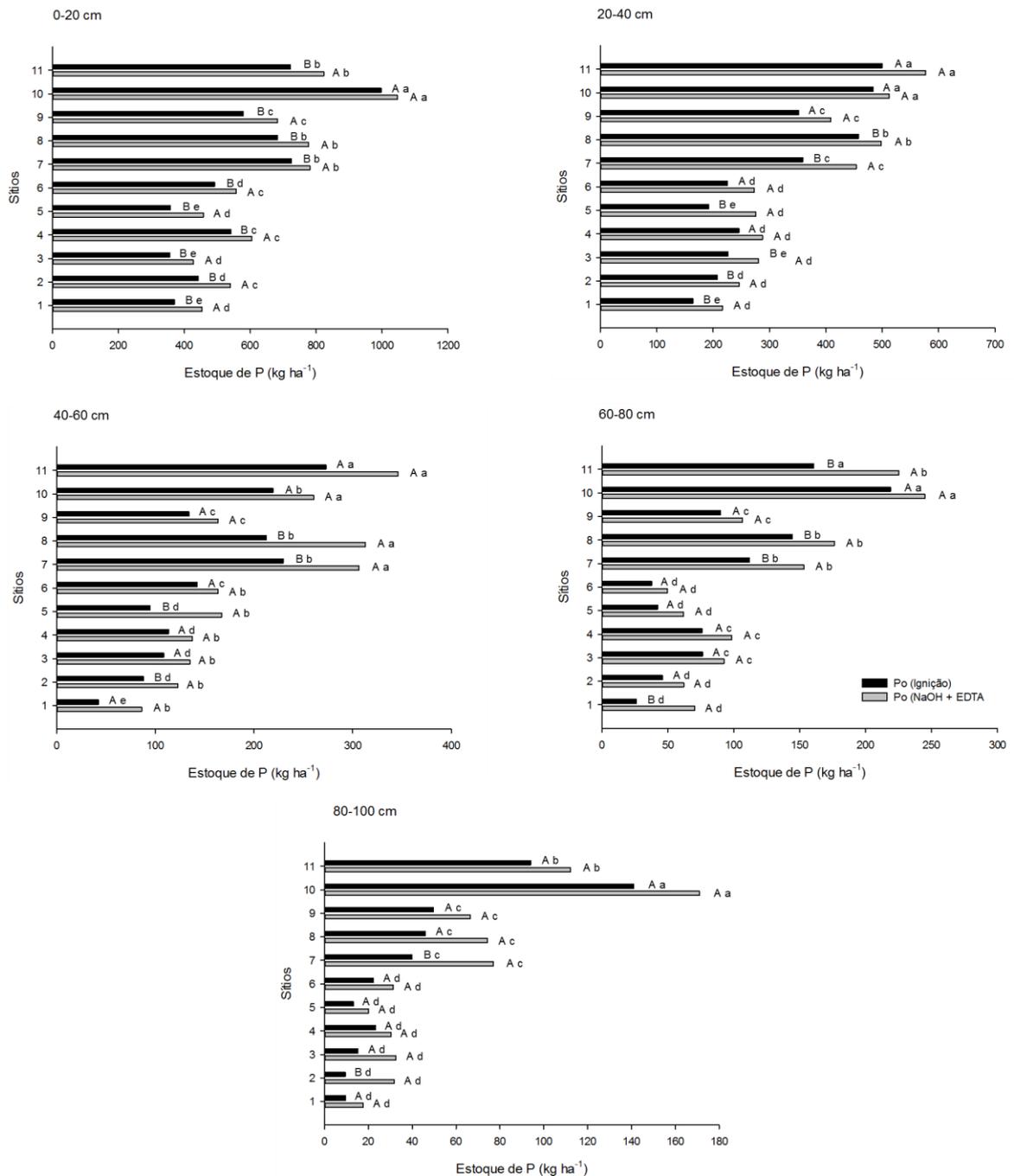


Figura 3. Estoque de Po do solo em diferentes profundidades, sobre diferentes sistemas de uso da terra na Região Sul da Bahia, Brasil, obtidos com dois métodos (ignição e NaOH + EDTA). Letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste t em 5% de probabilidade entre os métodos em cada sítio. Letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente pelo teste Scott-Knott em 5% de probabilidade em cada método. Sítios: 1: Pasto; 2: Floresta Natural; 3: Seringueira (monocultura); 4: Pasto; 5: Floresta Natural; 6: Seringueira (monocultura); 7: Seringueira + Açai; 8: Seringueira + Cacau; 9: Cacau + Eritrina; 10: Seringueira +

Cacau; 11: Seringueira + Cupuaçu. Os sítios listados de 1 a 3 são cultivados sobre Argissolo Amarelo; de 4 a 8 sobre Argissolo Acinzentado; de 9 a 11 sobre Nitossolo Háplico.

## Discussão

### Métodos de Determinação de Po no solo

Uma característica importante de um método de determinação do reservatório do nutriente no solo e sua disponibilidade para as plantas é a obtenção de valores relativamente altos do nutriente no solo, sendo que quanto maior, melhor, pois diminuiria a possibilidade do erro analítico. Por se tratar de uma medida indireta que requer a determinação do P total e Pi para obtenção do Po pela diferença entre essas formas de P, a inferioridade do poder de extração do método de ignição em relação ao método com NaOH + EDTA, pode ocorrer durante a extração ácida de amostras sem ignição que raramente recupera todo o Pi do solo, já que este extrator solubiliza principalmente as formas de P ligadas ao Ca (Novais e Smith, 1999) e os solos estudados apresentam pouco fósforo ligado ao Ca (variando de 1,60 mg kg<sup>-1</sup> a 5,74 mg kg<sup>-1</sup>). Segundo Condrón et al. (1990) e Turner et al. (2005), o método de ignição tende a superestimar o Po na maioria dos solos, através do aumento da solubilidade do Pi principalmente em solos com elevado grau de intemperismo.

Apesar da diferença na capacidade de extração dos dois métodos utilizados, a correlação altamente significativa entre os resultados obtidos com os dois métodos, indica que eles extraem dos mesmos reservatórios, um com mais intensidade que o outro, mas ambos podem representar o P no solo de forma eficiente em função do tipo de solo estudado.

Condrón et al. (1990), comparando métodos de ignição e extração na determinação de fósforo orgânico total de solos de várias partes do mundo, verificaram que para os dois métodos de extração os resultados foram similares, enquanto que pelo método de ignição foram obtidos os maiores valores de Po, resultados esses que divergem do presente estudo onde as maiores

concentrações de P foram encontradas utilizando o método de extração NaOH + EDTA. Turner et al. (1995) afirmam que a adição de EDTA ao solvente alcalino NaOH promove maior recuperação do Po do solo através da quelação de cátions metálicos, e que este método extrai quantidades semelhantes de Po pelo método de extração ácido-base de Bowman (1989).

Assim, a extração quantitativa de Po do solo é limitada pela ausência de um método direto para determinar os valores absolutos, já que cada metodologia extrai diferentes quantidades de P dependendo do tipo de extratores utilizados. Além disso, que existe dificuldade em uma metodologia avaliar a disponibilidade de P em um grande número de solos devido ao comportamento complexo deste elemento no solo (Silva e van Raij, 1999).

#### Estoque de Po no solo

Este estudo mostrou que as maiores quantidades de P (Pt, Pi e Po) na camada 0-100 cm do solo foram observadas no SAF seringueira + cacau sobre Nitossolo Háplico, refletindo o que ocorreu nas camadas superficiais (0-10 cm e 10-20 cm), como nas camadas mais profundas (60-80 cm e 80-100 cm). Este resultado pode ser decorrente de três fatores: (i) da idade do sistema, (ii) classe de solo e (iii) uso da terra.

Sistemas agroflorestais e florestais apresentam uma maior deposição de biomassa sobre o solo em sua fase inicial de implantação e de desenvolvimento, bem como o *turnover* de raiz é bem maior durante a fase de desenvolvimento da planta e decresce com a idade. Somarriba et al. (2013) afirmam que esses sistemas também alcançam seu clímax, fase em que ocorre diminuição do metabolismo da planta e da deposição de biomassa sobre e abaixo do solo.

A distribuição do P no solo é muito variável e depende de vários fatores, alguns deles são relativos às características intrínsecas do solo, como, por exemplo: material de origem, grau de evolução pedogenética dos solos, teor de argila. Gatiboni et al. (2013) afirmam que o grau de intemperismo do solo define a quantidade de P em cada forma, porém o presente estudo não permitiu avaliar o grau de intemperismo das classes de solo avaliadas. Guerra et al. (1996), citando Walker e Adams (1959), sobre a acumulação de P durante a pedogênese, afirmam que no início de formação do solo a quantidade de Po é

pequena, aumentando durante a fase de desenvolvimento do solo e decrescendo quando os solos envelhecem.

Os solos estudados apresentaram concentrações relativamente elevadas de P (variando de 3.122,39 kg ha<sup>-1</sup> a 19.971,46 kg ha<sup>-1</sup>). O *turnover* de Po é considerado fundamental na manutenção do suprimento de P em florestas tropicais (Condrón e Tiessen, 2005). Ao avaliar o Po em profundidade, diferenças significativas entre os diferentes sítios foram observadas em todas as camadas de solo. As frações de P apresentaram maior concentração na camada superficial, decrescendo com a profundidade. Tokura et al. (2002) e Zaia et al. (2012), utilizando o método proposto por Hedley; Nogueira et al. (2008), Dieter et al. (2010) e Bezerra et al. (2015) através do método proposto por Bowman, encontraram resultados com comportamento semelhante ao do presente trabalho. A maior concentração de Po em relação ao Pi na camada superficial é resultado dos processos biológicos, incluindo a queda de serapilheira, o *turnover* de raiz e a atividade microbiana combinada com a baixa mobilidade do P no solo.

Em sistemas florestais e agroflorestais a ciclagem biogeoquímica de P seria decorrente da deposição de resíduos da parte aérea na superfície do solo, no qual a incorporação desses resíduos se dá mediante o processo de decomposição que ocorre de forma mais expressiva nos primeiros centímetros do perfil do solo. O sítio que mais se destacou foi Seringueira + cacau sobre Nitossolo Háplico, em agroflorestas de cacau que apresentam alta taxa de adição de material vegetal, principalmente folhas, formando uma espessa camada de resíduos vegetais sobre o solo (Fontes, 2014), que pode alcançar cerca de 10 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Müller e Gama-Rodrigues, 2007); além disso, o cacaueiro apresenta sistema radicular superficial, apresentando, em média, 80% das raízes até 30 cm de profundidade (Gama-Rodrigues e Cadima, 1991), que constituiriam fontes de Po e proporcionariam aumento de P disponível mediante a exsudação de ácidos orgânicos. Assim, nos agrossistemas de cacau a serapilheira acumulada e o *turnover* de raízes poderiam proporcionar acúmulos substantivos de Po nas camadas mais superficiais do solo, como também observado por Fontes (2006).

É possível observar que a capacidade de recuperação do fósforo no solo foi diferente quando se comparam os dois extratores para a determinação do P-

Disponível, pois nota-se que a resina extraiu mais fósforo em relação ao extrator Mehlich-1 (Tabela 2). Este fato pode ser explicado, porque a RTA age de forma semelhante às raízes da planta, ou seja, quantificando também o fósforo lábil. De modo geral, as quantidades de fósforo extraídas pelos dois métodos variaram em termos relativos e se diferenciam quanto à capacidade de extração, uma vez que o uso de diferentes métodos na análise de fósforo leva a resultados não comparáveis em seus valores absolutos devido à influência de condições particulares de cada técnica de determinação (Silva e Braga, 1992).

Porém, o P-Disponível extraído através destes e outros métodos de rotina não reflete a real capacidade do P presente no solo no suprimento para as plantas já que não leva em consideração o Po. Dados mostrados no primeiro trabalho desta tese mostraram que o Po representou, em média, 66,4% do P-Disponível total na camada de 0-10 cm quando se utilizou a metodologia proposta por Hedley et al. (1982), indicando que o Po é fundamental para a nutrição das plantas nos sistemas estudados, tendo em vista que uma boa parte do P do solo encontra-se na forma orgânica como observado por diversos autores (Guerra et al., 1996; Cunha et al., 2007; Santos et al., 2008).

O maior estoque de Po foi encontrado até a profundidade de 40 cm, diminuindo consideravelmente na profundidade de 40-100 cm. Segundo Rheinheimer e Anghinoni (2001) e Araújo et al. (2004), esses resultados são devido à biociclagem de P pelas plantas, onde a absorção de P pelas raízes ocorre nas camadas inferiores do solo e é depositado na superfície através da deposição de resíduos vegetais.

## CONCLUSÕES

O método com NaOH + EDTA apresentou maior poder de extração, indicando que foi o método que melhor se adequou às classes de solo e aos diferentes sítios avaliados.

O Po decresceu com a profundidade, onde as maiores concentrações foram encontradas até a profundidade de 0-40 cm.

A distribuição das frações de P no solo foi influenciada pelo uso da terra, onde a agrofloresta cacau + seringueira cultivada sobre Nitossolo Háplico apresentou os maiores estoques de Po.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, J.D., Ingram, J.S.I. (1996) Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods. 2.ed. Wallingford, CAB International, 171p.
- Aray, Y., Sparks, D.L. (2007) Phosphate reaction dynamics in soils and soil components: a multiscale approach. *Advances in Agronomy*, 94, 135-179.
- Bezerra, R. P. M., Loss, A., Pereira, M. G., Perin, A. (2015) Frações de fósforo e correlação com atributos edáficos sob sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária no Cerrado Goiano. *Semina: Ciências Agrárias*, 36(3), 1287-1306.
- Bowman, R.A. (1989) A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and diluted base for soil organic phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53: 326-366.
- Condon, L. M., Moir, J. O., Tiessen, H., Stewart, J. W. B. (1990). Criticalevaluation of methods for determining total organic phosphorus in tropical soils. *Soil Science Society of America Journal*, 54(5), 1261-1266.
- Cross, A.F., Schlesinger, W.H. (1995) A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems, *Geoderma*, 64, 197-214.
- Cunha, G.M., Gama-Rodrigues, A.C., Costa, G.S., Velloso, A.C.X. (2007) Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no norte fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 667-671.
- Dawoe, E.K., Isaac, M.E., Quashie-Sam, J. (2010) Litterfall and litter nutrient dynamics under cocoa ecosystems in lowland humid Ghana. *Plant Soil* 330(1), 55-64.
- Dick, W.A., Tabatabai, M.A. (1977) Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. *Journal of Environmental Quality*, 6, 82-85.

- Dieter D., Elsenbeer H., Turner B.L. (2010) Phosphorus fractionation in lowland tropical rainforest soils in central Panama. *Catena*, 82(2), 118-125.
- Elser, J.J., Bracken, M.E.S., Cleland, E.E., Gruner, D.S., Harpole, W.S., Hillebrand, H. Ngai, J.T., Seabloom, E.W. Shurin, J.B., Smith, J.E. (2007) Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystem. *Ecology Letters* , 10(12), 1135-1142.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (1999) Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa Solos, 379p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2013) Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed., 353p.
- Fontes, A.G. (2006) Ciclagem de nutrientes em sistemas agroflorestais de cacau no sul da Bahia. Campos dos Goytacazes, RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2006. 71p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- Fontes, A.G., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Sales, M.V.S., Costa, M.G., Machado, R.C.R. (2014) Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. *Plant Soil*, 383, 313-335.
- Gama-Rodrigues, A.C., Cadima Z., A. (1991) Efectos de fertilización sobre sistema radicular de cacao en suelos de “tabuleiros” del sur de Bahia, Brasil. *Turrialba*, 41:135-141.
- Gatiboni, L. C., Brunetto, G., Rheinheimer, D.S., Kaminskii, J. (2013) Fracionamento Químico das Formas de Fósforo do Solo: Uso e Limitações. In: Tópicos em Ciência do Solo, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 8,141-187.
- Gatiboni, L. C., Kaminski, J., Rheinheimer, D.S., Brunetto, G. (2008). Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43, 1085-1091.
- Guerra, J.G.M., Fonseca, M.C.C., Almeida, D.J., De-Polli, H., Fernandes, M.S. (1996) Conteúdo de fósforo em amostras de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 31, 291-299.

- Hedley, M.J., Stewart J.W.B., Chauhan B.S. (1982) Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46, 970-976.
- Murphy, J., Riley, J. P. (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytical Chemistry Acta*, 27, 31-36.
- Müller, M.W., Gama-Rodrigues, A.C. (2007) Sistemas Agroflorestais com Cacaueiro. In: VALLE, R.R. ed. *Ciência, Tecnologia e Manejo do Cacaueiro*. Ilhéus, CEPLAC, p.246-271.
- Nogueira, R. S., Oliveira, T. S., Sá Mendonça Filho, E., Filho, J. A. A. (2008). Phosphorus fractions in a Luvissole Crômico Órtico under agroforestry systems in the Sobral, Ceará, Brazil. *Revista Ciencia Agronomica*, 39(4), 494-502.
- Novais, R.F., Smyth, T.J. (1999) *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, p.399.
- Novais, R. F., Smyth, T. J., Nunes, F. N. (2007) *Fósforo*. In: Novais, R.F., Alvarez, V. H., Barros, N. F., Fontes, R. L. F., Cantarutti, R. B., Neves, J. C. L. (eds.) *Fertilidade do solo*, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, p.471-550.
- Olsen, S.R., Sommers, L.E. (1982) Phosphorus. In: PAGE, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Ed.), *Methods of Soil Analysis – part 2*. Madison: American Society of Agronomy, 403-431.
- R Core Team (2016). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>
- Raij, B. van. (1991) *Fertilidade do solo e adubação*. São Paulo, Agronômica Ceres, 343p.
- Rita, J.C. O., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Zaia, F. C., Nunes, D. A. D. (2013). Mineralization of organic phosphorus in soil size fractions under different vegetation covers in the north of Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 1207-1215.
- Santos, D. R., Cassol, P. C., Kaminski, J., Anghinoni, I. (2008a) *Fósforo orgânico do solo*. In: Santos, G. A., Camargo, F. A. O. *Fundamentos da matéria*

- orgânica do solo- ecossistemas tropicais e subtropicais. 2. ed. Metrópole, Porto Alegre, p. 65-82.
- Santos, J. Z. L, Neto, A. E. F, Resende, A.V., Curl, N., Carneiro, L. F., Costa, S. E. V. G. A. (2008b) Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de Aplicação e cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32,705-714.
- Shen, J., Yuan, L., Zhang J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., Zhang, W., Zhang, F. (2011) Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. *Plant Physiology*, 156(3), 997-1005.
- Silva, J.T.A., Braga, J.M. (1992) Sensibilidade de extintores de fósforo e nível crítico de dez solos do Estado de Minas Gerais. *Revista Ceres*, 39( 226), 542-53.
- Somarriba, E., Cerda, R., Orozco L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espin, T., Mavisoy, H., Avila, G., Alvarado, E., Poveda, V., Astorga, C., Say, E., Deheuvels, O. (2013) Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agric Ecosyst Environ*, 173,46-57.
- SYSTAT SOFTWARE INC. Sigmaplot for windows (development and testing procedure) Version 11.0.
- Tokura, A.M.; Furtini Neto, A.E.; Curi, N.; Faquin, V.; Kurihara, C.H., Alovisi, A.A. (2002) Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 7, 1467-1476.
- Turner, B.L., Cade-Menun, B.J., Condrón, L.M., Newman, S. (2005) Extraction of soil organic phosphorus. *Talanta* 66, 294–306.
- Turner, B.L., Engelbrecht, B.M.J. (2011) Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests. *Biogeochemistry*, 103, 297-315.
- Vincent, A.G., Turner, B.L., Tanner, E.V.J. (2010) Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist Forest. *European Journal of Soil Science*, 61, 48-57.
- Yang, X., Post, W.M. (2011) Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. *Biogeosciences*, 8, 2907-2916.

- Zaia, F. C., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F. (2008a). Formas de fósforo no solo sob leguminosas florestais, floresta secundária e pastagem no Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1191-1197.
- Zaia, F. C., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Machado, R. C. R. (2008b). Fósforo orgânico em solos sob agrossistemas de cacau. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1987-1995.
- Zaia, F. C., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Moço, M. K. S., Fontes, A. G., Machado, R. C. R., Baligar, V. C. (2012). Carbon, nitrogen, organic phosphorus, microbial biomass and N mineralization in soils under cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, 86(2), 197-212.

## RESUMO E CONCLUSÕES

Através da técnica de fracionamento sequencial de P proposta por Hedley foi possível avaliar as frações de diferentes graus de disponibilidades de P às plantas, em diferentes sistemas de uso da terra e classes de solo. A distribuição das frações de P no solo foi influenciada tanto pelo uso da terra quanto pela classe de solo, assumindo que estas são dependentes das características químicas e físicas do solo.

Com o uso da modelagem de equações estruturais, foi elaborado um modelo para analisar o ciclo do P, o que possibilitou a confirmação da contribuição dos *Pools* orgânico, ocluso e inorgânico sobre o *Pool* disponível de P.

A MOS constitui um importante reservatório de Po que via mineralização pode disponibilizar P para ser reabsorvido pelas plantas, em médio e longo prazo e compensar parte das exportações de P do sistema, já que o Po é principal fonte de P para as plantas em sistemas agroflorestais e florestais sem o incremento da adubação fosfatada. Desta forma, um método eficiente capaz de estimar o Po presente no solo, permitiu avaliar o potencial dos diferentes sistemas de uso da terra em se manter sem a adição de insumos externos, o que não pode ser observado em uma análise de rotina de fertilidade. Portanto, recomenda-se o correto manejo dos diferentes sistemas de uso da terra que favoreçam a manutenção da serapilheira visando o aumento do Po no solo através da ciclagem de nutrientes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aleixo, S., Gama-Rodrigues, A.C., Costa, M.G., Sales, M.V.S., Gama-Rodrigues, E.F., Marques, J.R.B. (2016) P transformations in cacao agroforests soils in the Atlantic forest region of Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, 1-15.
- Andrade, F.V., Mendonça, E.S., Alvarez V.H., Novais, R.F. (2003) Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27, 1003-1011.
- Anghinoni, I., Bissani, C.A. (2004) Fósforo e adubos fosfatados. In: Bissani, C.A.; Gianello, C.; Tedesco, M.J., Camargo, F.A.O., eds. *Fertilidade dos solo e manejo da adubação de culturas*. Porto Alegre, Genesis. 1,117-138.
- Araújo, M. S. B., Salcedo, I. H. (1997) Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na Região Nordeste. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21 (4), 643-650.
- Arai, Y., Sparks, D.L. (2007) Phosphate reaction dynamics in soils and soil components: a multiscale approach. *Advances in Agronomy*, 94, 135-179.
- Ball-Coelho, B., Salcedo, I.H., Tiessen, H., Stewart, J.W.B. (1993) Short- and long-term phosphorus dynamics in a fertilized ultisol under sugarcane. *Soil Science Society of America Journal*, 57(4),1027-1034.
- Barbieri, D.M., Marques Junior, J., Alleoni, L.R.F, Garbuio, F.J., Camargo, L.A. (2009) Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. *Scientia Agricola*, 66, 819-826.

- Brady, N.C., Weil, R.R. (2013) Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 704p.
- Camargo, F.A.O., Gianello, C., Rheinheimer, D. (2008) Fracionamento do nitrogênio, fósforo, enxofre orgânico. In: Santos, G.A., Silva, L.S., Canellas, L.P., Camargo, F.A.O. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre. 243-258.
- Cardoso I., Janssen B., Oenema O., Kuyper T. (2003) Phosphorus pools in oxisols under shaded and unshaded coffee systems on farmers' fields in Brazil. *Agroforestry Systems*, 58(1), 55-64.
- Chen, C.R., Condon, L.M., Davis, M.R., Sherlock, R.R. (2003) Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand. *Forest Ecology and Management*. 177, 539-557.
- Condon, L.M., Moir, J.O., Tiessen, H., Stewart, J.W.B. (1990) Critical evaluation of methods for determining total organic phosphorus in tropical soils. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1261-1266.
- Condon, L.M., Newman, S. (2011) Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. *Soils and Sediments*, 11:830-840.
- Conte, E., Anghinoni, I., Rheinheimer, D.S. (2002) Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida pela aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26(4), 925-930
- Costa, M.G., Gama-Rodrigues, A.C., Gonçalves, J.L.D.M., Gama-Rodrigues, E.F., Sales, M.V.D. S., Aleixo, S. (2016). Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil. *Forests*, 7(1), 15.
- Cross, A.F., Schlesinger, W.H. (1995) A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems, *Geoderma*, 64, 197-214.
- Cunha, G.M., Gama-Rodrigues, A.C., Costa, G.S. e Velloso, A.C.X. (2007) Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no norte fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 667-671.
- Dieter D., Elsenbeer H., Turner B.L. (2010) Phosphorus fractionation in lowland tropical rainforest soils in central Panama. *Catena*, 82(2), 118-125.

- Eberhardt, D.N., Vendrame, P.R.S., Becquer, T., Guimarães, M.F. (2008) Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do P em latossolos sob pastagens no cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1009-1016.
- Elser, J.J., Bracken, M.E.S., Cleland, E.E., Gruner, D.S., Harpole, W.S., Hillebrand, H. Ngai, J.T., Seabloom, E.W. Shurin, J.B., Smith, J.E. (2007) Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystem. *Ecology Letters* , 10(12), 1135-1142.
- Essington, M.E. (2004) *Soil and water chemistry: an integrative approach*. Boca Raton: CRC Press, 534 p.
- Fontana, A., Pereira, M. G., Loss, A., Cunha, T. J. F., Salton, J. C. (2008) 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*, 14(1), 159-164.
- Furtini Neto, A. E., Vale, F. R. Resende, A. V. De, Guilherme, L. R. G., Guedes, G. A. De A. (2001) *Fertilidade do solo*. Lavras-MG: UFLA/FAEPE. 261p.
- Gama-Rodrigues A.C., Barros N.F., Comerford N.B. (2007) Biomass and nutrient cycling in pure and mixed stands of native tree species in southeastern Bahia, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 287-298.
- Gama-Rodrigues, A.C., Barros, N.F., Mendonça, E.S. (1999) Alterações edáficas sob plantios puros e mistos de espécies florestais nativas do sudeste da Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23, 581-592.
- Gatiboni, L. C., Brunetto, G., Rheinheimer, D.S., Kaminskii, J. (2013) Fracionamento Químico das Formas de Fósforo do Solo: Uso e Limitações. In: *Tópicos em Ciência do Solo*, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 8,141-187.
- Gatiboni, L.C., Kaminski, J., Rheinheimer, D.S., Brunetto, G. (2003) Superphosphate and rock phosphates as Phosphorus sources for grass-clover pasture on a limed acid soil in Southern Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34(17-18), 2503-2514.
- Gatiboni, L.C., Kaminski, J., Rheinheimer, D.S., Brunetto, G. (2008). Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição

- do fósforo disponível no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43, 1085-1091.
- Gatiboni, L.C., Kaminski, J., Rheinheimer, D.S., Flores, J.P.C. (2007) Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 31, 691-699.
- Gatiboni, L.C., Rheinheimer, D.S., Flores, A.F.C., Anghinoni, I., Kaminski, J., Lima, M.A.S. (2005) Phosphorus forms and availability assessed by  $^{31}\text{P}$ -NMR in successively cropped soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36, 2625-2640.
- Guerra, J.G.M., Fonseca, M.C.C., Almeida, D.J., De-Polli, H., Fernandes, M.S. (1996) Conteúdo de fósforo em amostras de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 31, 291-299.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., Nelson, W. L. (2005) *Soil fertility and fertilizers*. 7. ed. New Jersey: Person Prentice Hall, 515 p.
- Hedley, M.J., Stewart J.W.B., Chauhan B.S. (1982) Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46, 970-976.
- Johnson A.H., Frizano J., Vann D.R. (2003) Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure. *Oecologia*, 135(4), 487-499.
- López, C. F; Mendoza, R.; Vazquez, S. (2006) Fracciones de fósforo en suelos de corrientes con producción cítrica, arrocería y pastoril. *Ciencia del Suelo*, 24 (2), 161-168.
- Martinazzo, R., Santos, D.R., Gatiboni, L.C., Brunetto, G., Kaminski, J. (2007) Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio em resposta à adição de fosfato solúvel. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(3) 563-570.
- Matos, E.S., Mendonça, E.S., Villani, E.M.A., Leite, L.F.C., Galvão, J.C.C. (2006) 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*, 30, 625-632.
- Negassa, W., Leinweber, P. (2009) How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(3), 305-325.

- Novais, R.F., Smyth, T.J. (1999) Fósforo em solo e planta em condições tropicais, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, p.399.
- Novais, R. F., Smyth, T. J., Nunes, F. N. (2007) Fósforo. In: Novais, R.F., Alvarez, V. H., Barros, N. F., Fontes, R. L. F., Cantarutti, R. B., Neves, J. C. L. (eds.) Fertilidade do solo, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, p.471-550.
- Oliveira, R. I., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Zaia, F. C., Pereira, M. G., Fontana, A., (2014). Organic phosphorus in diagnostic surface horizons of different Brazilian soil orders. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 1411-1420.
- Pavinato, P.S., Dao, T., Rosolem, C.A. (2010) Tillage and phosphorus management effects on enzyme-labile bioactive phosphorus availability in Cerrado Oxisols. *Geoderma*, 156(3-4), 207-215.
- Partelli, F.L.P., Busato, J.G., Vieira, H.D., Viana, A.P. (2009) Qualidade da matéria orgânica e distribuição do fósforo no solo de lavouras orgânicas de café Conilon. *Ciência Rural*, 39(7), 2065-2072.
- Pereira, M.F., Loss, A., Beutler, S.J., Torres, J.L.R. (2010) Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45(5), 508-514.
- Pierzynski G.M., McDowell R.W., Sims J.T. (2005) Chemistry, cycling, and potential moment of inorganic phosphorus in soils. In: Sims, J.T., AN Sharpley, A.N. (eds) *Phosphorus: Agriculture and the Environment*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, p. 53–86.
- Raghothama, K.G., Karthikeyan, A.S. (2005) Phosphate acquisition. *Plant and Soil*, 274 (1/2), 37-49.
- Raij, B. van. (1991) Fertilidade do solo e adubação. São Paulo, Agronômica Ceres, 343p.
- Raij, B. van. (2004) Fósforo no solo e interação com outros elementos. In: Yamada, T., Abdalla, S.R.S. (Ed.). *Fósforo na agricultura brasileira*. Piracicaba: Potafos/Anda, 2004. p. 107-116.

- Rheinheimer, D.S., Anghinoni, I., Kaminski, J. (2000). Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24 (2),345-354.
- Richardson, A.E., Barea J.M., McNeill, A.M., Prigent-Combaret, C. (2009) Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganism. *Plant Soil*, 321, 305-339.
- Richter, D.D., Allen, H.L., Li, J., Markewits, D., Raikes, J. (2006) Bioavailability of slowly cycling soil phosphorus: major restructuring of soil P fractions over four decades in an aggrading forest. *Oecologia*, 150, 259-271.
- Rolim Neto , F.C., Schaefer, C.E.G.R., Costa, L. M., Corrêa, M. M., Fernandes Filho,E. I.; Ibraimo, M. M. (2004) Adsorção de fosforo, superficie especifica atributos mineralogicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 28(6), 953-964.
- Santos, D. R., Cassol, P. C., Kaminski, J., Anghinoni, I. (2008a) Fósforo orgânico do solo. In: Santos, G. A., Camargo, F. A. O. *Fundamentos da matéria orgânica do solo- ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2. ed. Metrópole, Porto Alegre, p. 65-82.
- Santos, D.R., Gatiboni, L.C., Kaminski, J. (2008b) Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, 38(2), 576-586.
- Sato, S., Comerford, N.B. (2005) Influence of soil pH on inorganic phosphorus sorption and desorption in a humid brazilian ultisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29(5), 685-694.
- Silva, M.A., Nóbrega, J.C.A., Curi, N., Siqueira, J.O., Sá, J.J.G., Marques, M., Motta, P.E.F. (2003) Frações de fósforo em Latossolos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38, 1197-1207.
- Shen, J., Yuan, L., Zhang J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., Zhang, W., Zhang, F. (2011) Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. *Plant Physiology*, 156(3), 997-1005.
- Smeck N.E. (1985) Phosphorus dynamics in soils and landscapes. *Geoderma*. 36,185–199.

- Solomon, D., Lehmann, J., Mamo, T., Fritzche, F., Zech, W. (2002) Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands. *Geoderma*, 105, 21-48.
- Souza, R.F., Faquin, V., Torres, P.R.F., Baliza, D.P. (2006) Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30(6), 975-983.
- Stutter, M.I., Shand, C. A., George, T.S., Blackwell, M.S.A., Dixon, L., Bol, R., Mackay, R.L., Richardson, A.E., Condrón, L.M., Haygarth, P.M. (2015) Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils. *Geoderma*, 257(1-3), 29-39.
- Taiz, L., Zeiger, E. (2009) *Fisiologia vegetal*, 4 ed. Porto Alegre: Arned. 819p.
- Tiecher, T.; Rheinheimer, D. S.; Kaminski, J. Calegari, A. (2012a) Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 271-281.
- Tiecher, T., Rheinheimer, D. S.; Calegari, A. (2012b) Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. *Soil and Tillage Research*, 124, 57-67.
- Tiessen, H., Stewart, J.W.B. e Cole, C.V. (1984) Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal*, 48, 853-858.
- Tirloni, C., Vitorino, A.C.T., Novelino, J.O., Tirloni, D., Coimbra, D.S. (2009) Disponibilidade de fósforo em função das adições de calagem e de um bioativador do solo. *Ciência e Agrotecnologia*, 33, 977-984.
- Tokura, A.M.; Furtini Neto, A.E.; Curi, N.; Faquin, V.; Kurihara, C.H., Alovise, A.A. (2002) Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 7, 1467-1476.
- Turner, B. L. (2008) Soil organic phosphorus in tropical forests: an assessment of the NaOH – EDTA extraction procedure for quantitative analysis by solution <sup>31</sup>P NMR spectroscopy. *European Journal of Soil Science*, 59, 453-466.
- Turner, B.L., Cade-Menun, B.J., Condrón, L.M., Newman, S. (2005) Extraction of soil organic phosphorus. *Talanta* 66, 294–306.

- Turner, B.L., Engelbrecht, B.M.J. (2011) Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests. *Biogeochemistry*, 103, 297-315.
- Turner, B.L., Frossard, E., Baldwin, D.S., (2003) Organic phosphorus in the environment. Ascona, Switzerland: Organic Phosphorus. 391p.
- Vincent, A.G., Turner, B.L., Tanner, E.V.J. (2010) Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist Forest. *European Journal of Soil Science*, 61, 48-57.
- Walker, T.W., Syers, J.K. (1976) The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15, 01-19.
- Wang L.J., Nancollas G.H. (2008) Calcium orthophosphates: crystallization and dissolution. *Chem Rev* 108, 4628–4669
- Yang, X., Post, W.M. (2011) Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. *Biogeosciences*, 8, 2907-2916.
- Zaia, F. C. (2005) Frações de fósforo do solo sob diferentes coberturas vegetais no Norte Fluminense e em plantios de cacau no sul da Bahia. Universidade Estadual do Norte Fluminense, 89p. Dissertação (Mestrado).
- Zaia, F.C., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F. (2008) Formas de fósforo no solo sob leguminosas florestais, floresta secundária e pastagem no Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1191-1197.
- Zaia, F. C., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Moço, M. K. S., Fontes, A. G., Machado, R. C. R., Baligar, V. C. (2012). Carbon, nitrogen, organic phosphorus, microbial biomass and N mineralization in soils under cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, 86(2), 197-212.
- Zamuner, E.C., Picone, L.I., Echeverria, H.E. (2008) Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. *Soil & Tillage Research*, 89(1), 70-77.