

TRANSFORMAÇÕES DAS FRAÇÕES DE FÓSFORO EM SOLOS DE
AGROFLORESTAS DE CACAU E SERINGUEIRA NO ESTADO DA
BAHIA, BRASIL.

SELDON ALEIXO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2014

TRANSFORMAÇÕES DAS FRAÇÕES DE FÓSFORO EM SOLOS DE
AGROFLORESTAS DE CACAU E SERINGUEIRA NO ESTADO DA
BAHIA, BRASIL.

SELDON ALEIXO

“Dissertação 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 Mestre em Produção Vegetal, com ênfase em Solos e Nutrição de Plantas”

Orientador: Prof. Antônio Carlos da Gama-Rodrigues

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO– 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCTA / UENF** 090/2014

Aleixo, Seldon

Transformações das frações de fósforo em solos de agroflorestais de cacau e seringueira no estado da Bahia, Brasil / Nome completo. – 2014.

56 f. : il.

Orientador: Antonio Carlos da Gama-Rodrigues.

Dissertação (Mestrado - Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campos dos Goytacazes, RJ, 2014.

Bibliografia: f. 46 – 56.

1. Fracionamento de fósforo 2. Fósforo orgânico 3. Modelagem de equações estruturais 4. Sistemas agroflorestais 5. Descritor I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. II. Título.

CDD – 631.4

TRANSFORMAÇÕES DAS FRAÇÕES DE FÓSFORO EM SOLOS DE
AGROFLORESTAS DE CACAU E SERINGUEIRA NO ESTADO DA
BAHIA, BRASIL.

SELDON ALEIXO

“Dissertação 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 Mestre em Produção Vegetal, com ênfase em Solos e Nutrição de Plantas”

Aprovada em 17 de fevereiro de 2014

Comissão Examinadora

Prof^a. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues (D.Sc., Ciência do Solo) – UENF

Prof^a. Marta Simone Mendonça Freitas (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF

Prof. Glaucio de Mello Cunha (D.Sc., Produção Vegetal) – UFES

Prof. Antônio Carlos da Gama-Rodrigues (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) –
UENF
(Orientador)

A Deus que sempre me guiou.

À minha família que nunca deixou de me apoiar em tudo que fiz.

A meu pai Deni (*in memoriam*), que mesmo não estando entre nós, sempre me apoiou em tudo e sem distinção até o momento de partir.

À minha mãe Márcia pelo incentivo, apoio, carinho, suporte e força para superar as dificuldades encontradas ao longo deste curso.

À minhas irmãs queridas, Débla e Bianca, que mesmo longe me ajudaram a vencer.

À Isabela de Almeida Montanha, por estar ao meu lado nos momentos de alegria e tristeza sempre me ajudando e animando com seu carinho e atenção.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Para que este trabalho fosse realizado, contei com a ajuda e o apoio de muitas pessoas, que contribuíram de diferentes formas na minha vida, mas sem dúvida cada uma foi especial e teve sua importância, à sua maneira.

Ao meu orientador Antonio Carlos da Gama-Rodrigues pela sua orientação, ensinamentos e apoio. A ele meu agradecimento.

A todos os colegas de laboratório, sendo eles alunos de IC, mestrandos, doutorandos, Pós-doutorados ou professores, agradeço por me ajudarem de todas as formas que só um amigo o faria. Às técnicas do Laboratório de Solos/CCTA/UENF: Vanilda e Katia. A José Raimundo Bonadie Marques por ceder as áreas experimentais para o presente estudo. A todos que não foram citados, mas que participaram, direta ou indiretamente, da minha formação.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense e professores, por terem fornecido a base de todo o meu aprendizado e por tornar possível a realização de um ideal.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pela concessão de bolsa de mestrado, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC) pelo apoio no trabalho de campo.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Sistemas agroflorestais.....	3
2.2. Fósforo no solo.....	5
2.3. Fracionamento de fósforo.....	7
2.4. Análise multivariada de dados	9
2.4.1. Análise fatorial.....	9
2.4.2. Regressão múltipla.....	10
2.4.3. Análise de trilha.....	11
2.4.4. Modelagem de equações estruturais.....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1. Descrição das áreas e amostragem do solo.....	14
3.2. Determinação das propriedades do solo.....	15
3.3. Fracionamento de fósforo do solo.....	16
3.4. Análise estatística.....	17
4. RESULTADOS.....	19
4.1. Propriedades do solo.....	19
4.2. Concentração das frações do solo.....	19
4.3. Fósforo total orgânico e inorgânico.....	25

4.4. Proporções das frações de fósforo.....	26
4.5. Análise de componentes principais.....	27
4.6 Correlação entre as frações de fósforo.....	29
4.7. Regressão múltipla e análise de trilha.....	31
4.8. Modelagem de equações estruturais.....	33
5. DISCUSSÃO.....	37
5.1. Fracionamento do fósforo do solo.....	37
5.2. Análise de componentes principais e correlações.....	40
5.3. Regressão múltipla e análise de trilha.....	41
5.4. Modelagem de equações estruturais.....	42
6. CONCLUSÕES.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

RESUMO

ALEIXO, Seldon; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Fevereiro, 2014; Transformações das Frações de Fósforo em Solos de Agroflorestas de Cacau e Seringueira no Estado da Bahia, Brasil; Orientador: Antônio Carlos da Gama-Rodrigues. Co-orientador: Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues

Solos tropicais tendem a passar de um caráter fonte de P, quando apresenta boa capacidade de suprimento para as plantas, para um caráter dreno, quando passa a fixar grande parte do P adicionado, forçando a competição na relação solo-planta. A deficiência de fósforo em solos tropicais torna-se um dos fatores limitantes à produtividade agrícola, aumentando a demanda de fertilizantes fosfatados por produtores que visam alta taxa de produção. Uma alternativa seria a adoção de agrossistemas acumuladores de matéria orgânica ligadas ao Po que possam ser manejados e assim fomentar o aumento de fósforo disponível para sistemas com déficit de reposição de fósforo, pois nesses agrossistemas a disponibilidade de fósforo está diretamente relacionada à ciclagem das formas orgânicas. Os objetivos foram avaliar a distribuição das frações lábeis e não lábeis de Pi e Po em sete sistemas agroflorestais de cacau (*Theobroma cacao* L.) e seringueira (*Hevea brasiliensis*), duas áreas comparativas (pasto e mata nativa) através da metodologia de fracionamento de fósforo proposto por Hedley et al. (1982); e estudar as relações e a distribuição das frações de P por meio de modelagem de equações estruturais. Os resultados demonstram que a adubação via fertilizantes fosfatados das agroflorestas analisadas proporcionou acumulação

de fósforo orgânico (Po). Um maior estoque de Po indica que a adubação fosfatada em agroflorestas de cacau e seringueira pode ser feita com um tempo maior entre as campanhas de fertilização (o Po pode suprir a demanda de fósforo à cobertura via mineralização). Os resultados demonstraram que a cobertura de seringueira pode contribuir positivamente na acumulação de fósforo para a agrofloresta com cacau em faixas duplas. A alta similaridade entre as faixas duplas de cacau, bem como entre as de seringueira, pode ser observada, apesar de CSFD-3, anteriormente pasto e CFSD-7, anteriormente uma capoeira. As agroflorestas de cacau em sistema de cabruca aberta, cabruca fechada, fragmento de mata nativa e pasto são similares entre si quanto às transformações de P no solo. A agrofloresta de cacau com *Erythrina* sp. foi a área que alcançou os maiores estoques de P-total (semelhantemente a cobertura CS-5) e a com maior estoque de Po-total, sendo ligado a uma maior acumulação de fósforo orgânico moderadamente lábil. Concluímos que o *pool* de Po constitui a principal fonte para o *pool* disponível. A modelagem de equações estruturais tornou-se uma ferramenta que possibilita o entendimento do ciclo do fósforo nos agrossistemas estudados, sobretudo na forma do manejo a ser implantado nesses agrossistemas.

Palavras-chave: Fracionamento de fósforo; Fósforo Orgânico; Modelagem de Equações Estruturais; Sistemas agroflorestais.

ABSTRACT

ALEIXO, Seldon; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; February, 2014; Transformations of Phosphorus Fractions in Soils Agroforestry Cocoa and Rubber Tree in the State of Bahia, Brazil; Advisor: Antônio Carlos da Gama-Rodrigues. Co-advisor: Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues

Tropical soils tend to spend a source character of P when presenting good supply capacity for the plants to a drain character when going to fix much of the P added forcing the competition at the soil-plant relationship. Phosphorus deficiency in tropical soils becomes one of the limiting factors to agricultural productivity generates an increase in the demand for phosphate fertilizers by farmers seeking high production rate, an alternative would be to adopt accumulators agroecosystems organic matter linked to the Po can be managed and thus foster the increase of available phosphorus for systems with deficit replacement of phosphorus because these agroecosystems availability of phosphorus is directly related to the cycling of organic forms. The objectives were to assess the distribution of labile and non-labile Pi and Po in seven agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao* L.) and rubber tree (*Hevea brasiliensis*) two comparative areas (pasture and native forest) through the methodology of phosphorus fractionation proposed by Hedley et al. (1982). Study the relationships and distribution of P fractions through structural equation modeling . The results show that fertilization via phosphate fertilizers of agroforestry analyzed led to the accumulation of organic phosphorus (Po). A larger stock of Po indicates that the

phosphorus in agroforestry cocoa and rubber can be made with a longer time between campaigns fertilization (Po can meet the demand for match coverage via mineralization). The results showed that the rubber cover can positively contribute to the accumulation of phosphorus agroforestry with cocoa double tracks. The high similarity between the double tracks of cocoa and between the rubber can be observed, despite CSFD-3 earlier pasture and CFSD-7 formerly a capoeira . The cocoa agroforests in cabruca open, closed cabruca, the native forest fragment and pasture system are similar to each other as the transformations in soil . The cacao agroforestry with *Erytrina* sp . was the area that reached the largest inventories of total-P (similar coverage CS-5) and with a larger stock of Po-total, being linked to a greater accumulation of moderately labile organic phosphorus. Concluded that the Po pool is the main source for the available pool. The structural equation modeling has become a tool that enables understanding of the phosphorus cycle in agricultural systems studied, especially in the form of management to be implemented in these agricultural systems.

Keywords: Fractionation of phosphorus; Organic Phosphorus; Structural Equation Modeling; Agroforestry Systems.

1. INTRODUÇÃO

Os minerais fosfatados são a fonte natural de fósforo (P) para a solução do solo, sendo sua liberação ocasionada pelo intemperismo. A disponibilidade e mobilidade do P nos solos é dependente de suas formas químicas (Yang et al., 2013), e encontram-se no solo sob duas formas principais, inorgânicas (Pi) e orgânicas (Po), e de acordo com seu grau de estabilidade ou solubilidade, apresentam-se em diferentes graus de disponibilidades de absorção às plantas, com sua dinâmica associada aos fatores ambientais que regulam a atividade dos microrganismos (imobilização ou liberação de P) e às propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo (Carneiro et al., 2011).

O Pi pode ser encontrado em solução, precipitado com Al, Fe e Ca ou adsorvido aos óxidos de Fe e Al da fração argila (Rheinheimer et al., 2000), ambos em equilíbrio com a solução, e compõem a fração lábil de P do solo, já o Po é formado pelos íons fosfatos ligados aos compostos orgânicos (Souza et al., 2007).

Solos tropicais tendem a passar de um caráter fonte de P, quando apresentam boa capacidade de suprimento para as plantas, para um caráter dreno, quando passam a fixar grande parte do P adicionado, forçando a competição na relação solo-planta e com posterior aumento da degradação de minerais inorgânicos, e a mineralização do Po em formas mais estáveis sem que haja reposição suficiente do elemento na sua forma Pi (Farias et al., 2009).

Conforme a sequência dessa dinâmica, a planta tende a absorver o Pi diretamente do que é depositado pela biomassa vegetal e do que foi mineralizado dos coloides orgânicos (Novais et al., 2007).

A deficiência de fósforo em solos tropicais torna-se um dos fatores mais limitantes à produtividade agrícola (Grierson et al., 2004), o aumento da produtividade agrícola em zonas tropicais aumenta a demanda de fertilizantes fosfatados e muitas vezes agricultores os aplicam em excesso, muito além das exigências culturais (Alamgir et al., 2012). Uma alternativa seria a adoção de agrossistemas acumuladores de matéria orgânica ligadas ao Po que possam ser manejados e assim fomentar o aumento de fósforo disponível para sistemas com déficit de reposição de fósforo, pois nesses agrossistemas a disponibilidade de fósforo está diretamente relacionada à ciclagem das formas orgânicas (Gama-Rodrigues et al., 2007; Rheinheimer et al., 2008; Zaia et al., 2008b) o que pode suprir uma considerável fração do fósforo reabsorvido pela cobertura vegetal (Turner et al., 2003), tornando-se uma prática de menor impacto ambiental e sustentável.

Metodologias de extração sequencial do fósforo presente no solo foram adotadas ao longo do tempo, visando quantificar os seus *pools* através de esquemas que envolvem a adoção de reagentes seletivos de acordo com o grau de força de ligação entre o P e os diversos componentes do solo. Condrón e Newman (2011), em revisão sobre os fundamentos do fracionamento de P em solo e sedimentos, propuseram diversos protocolos de extração. Levando em consideração o uso da terra em comparação aos diferentes tipos de solos e manejo de sistemas está o fracionamento proposto por Hedley et al. (1982), que foi um dos precursores na determinação de frações orgânicas e inorgânicas de P. Esta metodologia consegue separar o fósforo do solo em cinco frações inorgânicas, três orgânicas e uma residual.

Os objetivos foram avaliar a distribuição das frações lábeis e não lábeis de Pi e Po através do fracionamento em diferentes sistemas agroflorestais de cacau (*Theobroma cacao* L.) e seringueira (*Hevea brasiliensis*) e estudar as relações e a distribuição das frações de P por meio de modelagem de equações estruturais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Sistemas agroflorestais

Um sistema agroflorestal (SAF) caracteriza-se por ser um sistema de produção composto por duas ou mais espécies, sendo que ao menos uma lenhosa e perene, entretanto as espécies florestais utilizadas não precisam ter utilidade madeireira, mas possuir interações ecológicas, bem como econômicas, entre as espécies lenhosas e não lenhosas no sistema (Young, 1989).

A cultura do cacau (*Theobroma cacao* L.), segundo Müller et al. (2003), torna-se um modelo próximo ao ideal de um sistema agroflorestal sustentável por possuir um caráter socioambiental que leva em consideração a preservação de fragmentos florestais, matas ciliares, nascentes de mananciais e a redução da degradação dos solos por processos erosivos, bem como da conscientização e instrução do homem do campo acerca da produção de cacau e preservação do meio ambiente, além da geração permanente de empregos.

O caráter econômico de SAF de cacau está em consonância com a venda do seu produto (sementes), a possível reposição dos nutrientes do solo através da translocação de nutrientes da serapilheira decomposta, minimizando assim, maiores gastos com adubação e uma possível extração sustentável da madeira de espécies arbóreas de interesse econômico que corroboraria a definição de SAF feita por Young (1989).

Müller e Gama-Rodrigues (2012) descrevem existência de três sistemas de agroflorestas de cacau: O cacau cabruca, onde os cacauzeiros são cultivados sob a mata atlântica raleada, cuja produtividade torna a atividade pouco rentável, porém ecologicamente sustentável. O sistema de produção de *Theobroma cacao* L. em consórcio com seringueira (*Hevea brasiliensis*), onde se tem a derrubada inicial da floresta nativa passando pelo plantio de seringueiras e posterior adequação das mudas de cacauzeiro nas entrelinhas de seringueiras adultas. Nesse sistema de SAF podem-se ter dois produtos de interesse econômico como o látex da seringueira e a semente de cacau. O terceiro modelo SAF é composto pelo consórcio de *Theobroma cacao* L. com eritrina (*Erythrina* sp.), que semelhantemente a implantação do consórcio cacau com seringueira inicia-se com a retirada das espécies vegetais nativas para o plantio de mudas de cacauzeiros sob sombreamento de cultivares de interesse alimentício como mandioca, milho e banana, até que as mudas de eritrina possam fornecer um sombreamento eficiente a cultura do cacau.

Os SAF's podem simular ou, até mesmo, equiparar-se a ecossistemas naturais em sua estrutura funcional, conservação espécies e meio ambiente (Melo et al., 2001). Do ponto de vista da conservação de solos podem controlar a erosão pelo menor revolvimento do solo e manter a matéria orgânica do solo com um maior grau de agregação, além de promover uma eficiente ciclagem de nutrientes (Young, 1989), assim a interação desses fatores contribuirá para a melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Syers e Craswel, 1995), dando origem a um solo mais produtivo de fertilidade elevada.

A fertilidade pode ser descrita como a capacidade do solo em ceder elementos essenciais às plantas (Novais et al., 2007), e assim a implementação de SAF's torna-se útil por possuir certa eficácia em utilizar recursos escassos como fósforo em solos tropicais de baixa fertilidade natural e altas concentrações de alumínio trocável (Kanmegne et al., 1999; Radersma, 2002). O balanço de nutrientes em agrossistemas advindos da produção de biomassa demonstra uma alta reposição do elemento fósforo através da ciclagem (Fassbender, 1993). O acúmulo significativo de serapilheira em agroflorestas de *Theobroma cacao* L. com leguminosas florestais como a *Erythrina* sp. poderá vir a dispensar a adubação fosfatada e nitrogenada em determinados períodos de tempo (Haggar et al., 2011) contribuindo para a otimização do uso de fertilizantes.

2.2. Fósforo no solo

O elemento fósforo é um nutriente essencial à manutenção da vida de todos os organismos que pode limitar a produção vegetal por ser um recurso finito (Tiessen et al., 2011) com baixa disponibilidade em solos tropicais. Alguns dos processos ligados ao metabolismo vegetal têm a participação do fósforo como a síntese de moléculas armazenadoras de energia (ATP) e ácidos nucleicos, manutenção da membrana plasmática através de fosfolipídios, além de atuar na fixação biológica de N_2 (Bieleskil e Ferguson, 1983). Assim, a dinâmica desse elemento assume um caráter decisivo em relação a produção vegetal, e esta tende ser comprometida quando ocorre déficit desse nutriente no sistema, sendo necessária a adoção de fertilizantes em larga escala.

O solo possui diversas concentrações de fósforo inorgânico e orgânico e a sua dinâmica é controlada por agentes físicos, químicos e biológicos (Frossard et al., 2000). Os minerais fosfatados são a fonte primária de P para a composição do solo e sua liberação ocasionada principalmente pelo intemperismo. O fósforo torna-se disponível à solução do solo e assim às plantas, entretanto a maior parte do P que é liberado dos minerais fonte, com a apatita ($Ca_3(PO_4)_2(OH, F, Cl)$), liga-se a coloides inorgânicos do solo (Stevenson e Cole, 1999) e componentes como o alumínio (Al) cálcio (Ca) e ferro (Fe) ou até mesmo adsorvido a argilas silicatadas, além da matéria orgânica do solo (Rheinheimer et al., 2000). Esse P_i torna-se disponível de uma maneira mais eficiente ao solo do que na forma composta por agregados orgânicos que dependem da degradação da matéria orgânica por microrganismos (Barber, 1995).

O P_o pode ter origem nos resíduos orgânicos decompostos da cobertura vegetal por microrganismos e até mesmo do tecido microbiano (Martinazzo et al., 2007). O P_o no solo pode variar de 20 a 80% do fósforo total da camada superficial o que o torna importante para a dinâmica de P em solos intemperizados (Agbenin e Tiessen, 1994; Rheinheimer e Anghinoni, 2002). Os microrganismos mineralizam o P_o diretamente da matéria orgânica quando há baixo aporte de P_i ao solo (Stewart e Tiessen, 1987), sendo a incorporação do fósforo presente em resíduos vegetais pela biomassa microbiana, ocorrendo em curtos períodos (Richardson e Simpson, 2011).

O fósforo orgânico possui maior contribuição para a nutrição vegetal quando há deficiência de P no solo (Zaia et al., 2008a), portanto a mineralização do Po tem um papel importante na ciclagem do fósforo no solo (Oehl et al., 2004), sendo fundamental para disponibilização deste elemento às plantas após a morte dos microrganismos e sua liberação no solo. A intensidade da atividade microbiana e a qualidade do resíduo depositado no sistema podem interferir na ciclagem de P e na acumulação de formas mais recalcitrantes de Po. Em se tratando de resíduos ricos em lignina, ou na sua rápida disponibilização através de resíduos com baixa relação C/N, a imobilização de P em formas orgânicas advindas da biomassa microbiana tende a aumentar a sua disponibilidade a médio e longo prazo às culturas evitando que os colóides inorgânicos do solo adsorvam grande quantidade de P dificultando a absorção das plantas.

Diversos são os trabalhos que demonstram a acumulação e o predomínio de formas orgânicas de P em sistemas tropicais. As concentrações de Po em diferentes solos tropicais variaram de 22 a 494 mg kg⁻¹, o que representou cerca de 26% do P total em florestas no Panamá (Turner e Engelbrecht, 2011). O predomínio do Po sobre a fração inorgânica representou mais de 80% em solos sob florestas e cerca de 65% em solos sob eucalipto (Cunha et al., 2007). Em plantios florestais de pinheiros, o Po contabilizou mais de 50% do P total do solo na camada superficial de 0-20 cm e que o percentual de acumulação das formas orgânicas de P aumentava de acordo com a idade dos plantios, demonstrando que a deposição de resíduos vegetais contribuía de forma significativa para a acumulação de Po (Slazak et al., 2010), ao passo que a remoção dos resíduos vegetais em florestas tropicais reduziu o percentual de acumulação de formas orgânicas totais de P no solo o que se mostrou imprescindível para a manutenção do crescimento da floresta. (Vincent et al., 2010). A acumulação de matéria orgânica no solo advinda dos resíduos da cobertura demonstra que o Po está associado ao P disponível para a cobertura vegetal em sistemas agroflorestais (George et al., 2002; Comerford et al., 2006).

Independentemente da natureza química, que separa o fósforo somente em orgânico e inorgânico, a fertilidade do solo quantifica segundo as formas lábeis e não lábeis de Pi e Po capazes de repor o P à solução do solo após absorção pelas plantas. O modelo de disponibilização por interdependências e equilíbrio entre compartimentos no solo é uma tentativa de quantificação, onde o

compartimento definido como o fator intensidade (I) é formado pela solução do solo onde se encontra o fósforo em solução (P-Solução); o compartimento definido como o fator quantidade (Q) representa a reserva de P do solo em sua fase sólida. Este P presente no compartimento é denominado de P-Lábil, e está em equilíbrio dinâmico o P-solução. A relação de contribuição P estabelecida entre o fator “Q” e “I” pode ser interpretada como fator capacidade ou poder tampão (Q/I) que é definida pela reação de adsorção e dessorção do elemento P e seu grau de labilidade. O último compartimento condiciona as formas de P-não lábil (NQ) que requerem mecanismos específicos para liberação em formas mais lábeis (Novais e Smyth, 1999). Entretanto a quantificação e o entendimento da dinâmica de P torna-se uma tarefa complexa devido à grande teia de relações que possam ocorrer entre os diversos compartimentos (*pools*) de P.

2.3. Fracionamento de Fósforo

Metodologias de extração sequencial de P presente no solo foram adotadas ao longo do tempo, visando quantificar os diversos compartimentos através de metodologias que envolvem a adoção de extratores de acordo com o grau de força de ligação entre P e os componentes do solo (Condron e Newman, 2011). Existem diversos protocolos adotados que sofreram alterações no decorrer do tempo, assim a busca por uma metodologia que quantifique de forma mais precisa o P presente no solo torna-se uma fronteira, tendo em vista que não há um protocolo de fracionamento que possa descrever, de forma precisa, todas as interações entre diferentes solos e coberturas (Gatiboni et al., 2013). Algumas revisões publicadas recentemente descrevem fracionamentos para P em solos e sedimentos (Cross e Schlesinger, 1995; Petterson et al., 1988; Negassa e Leinweber, 2009; Condron e Newman, 2011).

Diversos esquemas de fracionamento de fósforo do solo foram descritos ao longo do tempo como o proposto por Bowman e Cole (1978), onde a sua principal vantagem é a quantificação de frações lábeis de P_o , frações moderadamente lábeis que estão associadas a ácidos fúlvicos e frações mais resistentes de P ligado aos ácidos húmicos. Entretanto o fracionamento mais difundido e utilizado é o esquema de Hedley et al. (1982). Eles desenvolveram um método de fracionamento sequencial de P do solo capaz de distinguir as frações

láveis das não-láveis, identificar as frações estáveis e separar as frações orgânicas das inorgânicas, em ordem decrescente de disponibilidade à biomassa microbiana e às plantas. Esta metodologia está descrita no item 3.3 em “materiais e métodos”. O grande diferencial deste esquema de extração de P está no fato de conseguir identificar que o Po extraído por bicarbonato (NaHCO_3) após a digestão do extrato possa ser identificado facilmente como mineralizável e disponível às plantas e aos microrganismos, enquanto o Po extraído por NaOH e o Po resultante da aplicação do ultrassom, estarem física e quimicamente protegidos no solo, além de utilizar resina trocadora de ânions (RTA) que reproduz de forma semelhante o processo de absorção de P-solução pelos vegetais *in situ* (Silva & Raij, 1999).

Segundo Cross e Schlesinger (1995), o método mais efetivo no estudo do ciclo biogeoquímico do P do solo em ecossistemas naturais é o fracionamento de Hedley et al. (1982). Segundo os autores, esse fracionamento consegue 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, sendo esses *pools* diminutos em sistemas naturais em relação aos manejados, a ciclagem de P torna-se o principal determinante da sua disponibilidade (Tiessen e Moir, 2007), assim os *pools* de P são supridos através de dissolução ou dessorção do P-disponível e da mineralização do P-orgânico. Essa metodologia de fracionamento sequencial leva em consideração o uso da terra em comparação aos diferentes tipos de solos e manejo de agrossistemas temperados, subtropicais e tropicais para quantificar os *pools* de fósforo e descrever a sua dinâmica no ecossistema (Negassa e Leinweber, 2009).

A quantificação das frações de fósforo no solo pode ser feita através de frações lábeis (P-lábil), quando são compostas pelo somatório das frações extraídas por RTA e das frações inorgânica e orgânica extraídas com NaHCO_3 . Frações moderadamente lábeis de fósforo (P-mod.lábil) são compostas pelas frações orgânica e inorgânica de P ligados com maior energia a Fe e Al, o que corresponde ao fósforo extraído com NaOH. As frações inorgânicas e orgânicas extraídas com NaOH adicionado de ultrassom correspondem ao P-ocluso adsorvido no interior de agregados. Frações de P ligado ao Ca com disponibilidade restrita são formadas pela fração extraída com HCl. O P-residual corresponde a frações insolúveis de fósforo (Novais et al., 2007).

A dinâmica do fósforo no solo em agrossistemas torna-se uma fronteira, tendo em vista que o manejo de agrossistemas é importante para manter a produtividade de alimentos no mundo (Oberson et al., 2011). Trabalhos realizados visando quantificar os estoques de P em sistemas agroflorestais tropicais vêm sendo realizados ao longo dos últimos anos. Szott e Melendez, (2001) comparando a disponibilidade de fósforo, após extração sequencial, sob cultivos anuais fertilizados, não fertilizados e sistemas agroflorestais multiestratificados, concluíram que a disponibilidade de P nas culturas era menor em sistemas de plantio não fertilizados e superiores em agroflorestas, entretanto em sistemas fertilizados a disponibilidade de P foi superior a agroflorestas pelo acúmulo de Pi.

A metodologia de fracionamento de P pode avaliar os *pools* de P no solo que pode estar sendo suprido com base na translocação de nutrientes via serapilheira de agroflorestas, bem como a incorporação de Po nos *pools* disponíveis diminuirá a fixação em frações menos lábeis, aumentando a disponibilidade de nutrientes (Lehmann et al., 2001). A acumulação de Po em agroflorestas de cacau é uma realidade (Zaia et al., 2008a), assim como a relação da dinâmica do fósforo orgânico com outros nutrientes presentes no solo (Zaia et al., 2012) que possam ser analisadas através de metodologias de fracionamentos de fósforo do solo. Contudo, poucos são os trabalhos que utilizam fracionamento de P em agrossistemas e que visam o entendimento da dinâmica de P para aperfeiçoar o manejo desse nutriente em agroflorestas. O desenvolvimento e aplicação de novas metodologias de fracionamento e quantificação de P no solo devem ser levados em consideração no monitoramento efetivo das relações de P no solo de agroflorestas (Negassa e Leinweber, 2009).

2.4. Análise multivariada de dados

2.4.1. Análise fatorial

A Análise Fatorial é uma técnica multivariada desenvolvida no intuito de encontrar fatores significativos que expliquem os resultados amostrais observados, assumindo uma relação linear entre as variáveis observadas e seus fatores, entretanto esta relação fica sujeita a estimação devido ao erro. As

covariâncias entre as observações e seus fatores utilizadas para estimação buscam a relação entre as variáveis de um modelo objetivado, o que torna a análise fatorial uma ferramenta estatística.

A *principal component analysis* (PCA), ou análise de componentes principais, é uma abordagem estatística que está presente na técnica de análise fatorial e é utilizada para prever inter-relações entre variáveis numerosas e explicá-las em conjuntos comuns denominados fatores (Hair et al., 2009). O PCA foi desenvolvido para gerar um conjunto reduzido de variáveis e assim não comprometer as informações e características dos dados a serem analisados, objetivando fins confirmatórios baseados em parâmetros predeterminados já observados a serem provados através de possíveis hipóteses. Ainda, segundo Hair et al. (2009), a metodologia de PCA é mais efetiva ao objetivar a redução dos dados para considerar um número mínimo de fatores. Assim, no geral podem ser observados três componentes principais, entretanto o terceiro fator pode ser desprezível de acordo com seu autovalor, geralmente inferior a 1 (um). Os componentes principais, ou fatores, são escolhidos de forma que possam explicar a maior porção da variância total, quando a variância específica e o erro representam uma fração pequena da variância total. Resumindo, o PCA possibilita agrupar os dados por similaridade de acordo com o conjunto de características e identificar as relações entre dados obtidos buscando padrões de distribuição (Zhang et al., 2009).

2.4.2. Regressão múltipla

A regressão múltipla é uma técnica estatística que analisa a relação de dependência de uma única variável em função de diversas variáveis independentes com valores conhecidos para estimar valores em relação à variável dependente (Hair et al., 2009). Cada variável independente passa pela análise de regressão onde é ponderada. O conjunto das variáveis independentes ponderadas será a partir da equação de regressão que é composta pelo coeficiente de determinação (R^2), efeito direto das variáveis independentes (β) e pela significância dos coeficientes de regressão, onde as variáveis que não contribuem significativamente para a estimativa da variável dependente serão eliminadas através de etapas sequenciais.

Um modelo de regressão múltipla simples pode ser apresentado pela equação:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon, \quad (1)$$

onde, o “ y ” representa a variável dependente; o “ x ” as variáveis independentes; e o β os parâmetros desconhecidos das variáveis independentes, ou seja, os coeficientes de regressão (Hines et al., 2012). O objetivo desta análise é relacionar a variável dependente com diversas variáveis independentes e buscar relações causais, assim o pesquisador deve ter em vista a seleção exata das variáveis selecionadas com dependentes e independentes, especificação da relação estatística entre os dados e, por fim, a adequação da hipótese a ser pesquisada (Hair et al., 2009).

Ainda, segundo Hair et al. (2009), a regressão múltipla pode ser realizada através de métodos de seleção de variáveis, estas são incluídas ou excluídas de acordo com critérios estabelecidos. O método de adição *forward* inclui variáveis no modelo de regressão a partir do início, ou seja, sem qualquer variável existente, e passa a acrescentá-las de acordo com a sua contribuição para a análise; já o método de eliminação *backward* inclui todas as variáveis independentes e passa a eliminá-las com base na menor contribuição para com a variável dependente; por fim, tem-se a estimação por *stepwise* que busca a adição de variáveis independentes de acordo com a inclinação para com a variável dependente. O método de adição se baseia na predileção estatística dos coeficientes de correlação parcial das variáveis independentes, sendo a eliminação baseada no decaimento desses mesmos coeficientes e, por sua vez, substituídas por variáveis independentes significantes ao modelo.

2.4.3. Análise de trilha

A ferramenta multivariada de dados em análise de trilha leva em consideração os efeitos diretos e indiretos dos caracteres independentes sobre uma variável dependente principal, cujas estimativas são obtidas por meio de equações de regressão, sendo as variáveis previamente padronizadas (Daher et al., 2004). O desdobramento de correlações estimadas é chamado de efeitos diretos e indiretos, e estes são dependentes do conjunto de característica

estudado, que por sua vez é estabelecido a partir do conhecimento prévio e das inter-relações de diagramas de trilha. Assim, a definição de efeito indireto seria a influência de uma variável em outra, por intermédio de outra variável do conjunto de dados, e o efeito direto é a influência de uma variável sobre outra do mesmo conjunto (Bistaffa, 2010).

2.4.4. Modelagem de Equações Estruturais

A técnica de estatística multivariada de *structural equation modeling* (SEM), ou modelagem de equações estruturais, tem por base a combinação de análise fatorial e regressão múltipla para testar e estimar relações causais a partir de combinações de dados estatísticos, possibilitando o estudo de variados casos em um único conjunto de dados (Hair et al., 2009; Prober e Wiehl, 2012). O SEM fornece a interpretação de relações hipotéticas de causa e efeito entre diversas variáveis para a obtenção de hipóteses, levando em consideração padrões de dependência estatística. As inter-relações dentro da composição de dados descreve o efeito, seja ele direto e/ou indireto, que as variáveis independentes, sejam elas observadas e/ou latentes, possuem sobre as variáveis dependentes observadas e/ou latentes (Hershberger et al., 2003; Grace e Bollen, 2008).

Diversos são os trabalhos realizados utilizando modelagem de equações estruturais em solos, entre eles está à avaliação das mudanças na composição da comunidade microbiana do solo com correlações entre as variáveis ambientais, onde se chegou à interpretação de que as mudanças na biomassa microbiana foram atribuídas à alteração nas concentrações de carbono e nitrogênio no solo ao longo do perfil (Allison et al., 2007). A determinação dos fatores que definem a distribuição e os grupos de camadas das macrofaunas e a estrutura do solo foi feita com a ajuda do SEM por Doblas-Miranda et al. (2009), onde descobriu que a distribuição das diversas comunidades de fauna do solo se movem em diferentes níveis no solo. Entretanto modelos que buscam padrões de distribuição das frações de P no solo ainda são considerados escassos, o que dificulta o entendimento da dinâmica do fósforo no solo.

As transformações de P em solos tropicais através de modelagem de equações estruturais foi descrita recentemente por Gama-Rodrigues et al. (2014). Nele, os autores propõem a utilização de modelos conceituais para o melhor entendimento

da dinâmica de P, bem como na interferência que os *pools* de P podem sofrer, sendo essas relações não observadas por métodos convencionais de análise de P do solo por não serem sensíveis em detectar mudanças nas frações de fósforo. Com base em conhecimentos clássicos acerca da dinâmica do fósforo no solo foi idealizado um modelo estrutural hipotético para ilustrar o ciclo de P em solos não fertilizados (Figura 1), com a contribuição dos diversos *pools* de fósforo para o fósforo disponível (Pi-resina) aos vegetais. Entretanto, esse modelo necessita de ajustes com base nos índices de viabilidade estabelecidos por Grace (2006), Byrne (2009) e Hair et al. (2009) para que se possa ilustrar o ciclo de P no solo.

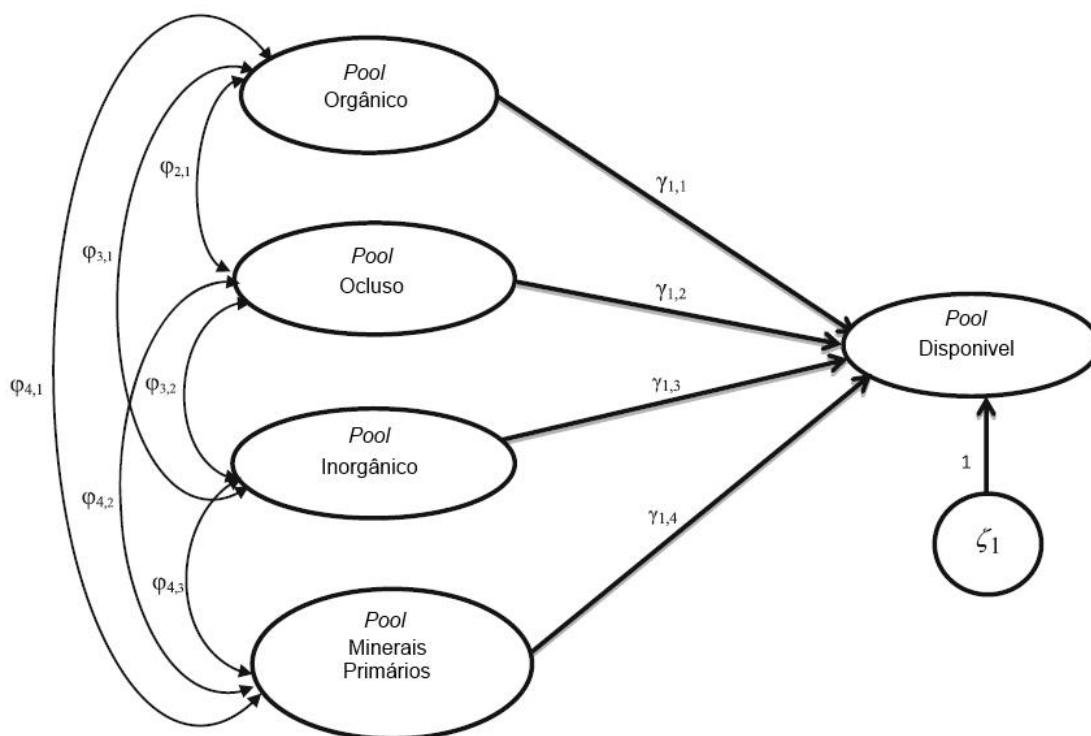


Figura 1 - Modelo estrutural hipotético para o ciclo de P no solo. Fonte: Gama-Rodrigues et al. (2014)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Descrição das áreas e amostragem do solo

A “Fazenda Porto Seguro” está localizada no município de Uruçuca, Estado da Bahia, Brasil (14° 35' 34" S, 39° 17' 2" W). Possui clima úmido a subsumido, com temperatura média do mês mais frio, superior a 18°C com estação seca de pequena duração com elevada precipitação nos demais meses (Golfari et al., 1978). O solo da região foi classificado como Latossolo Amarelo Distroférico típico (Santana et al., 2002).

A primeira área (CS-1) com 35 anos de uso em sistema de produção agroflorestal de cacau com eritrina (*Erythrina* sp.) passou para agrofloresta de cacau com seringueira (*Hevea brasiliensis*) com três anos de uso. A segunda área (CE-2) de sistema agroflorestal composta de cacau e eritrina com 35 anos de uso. A terceira área (CSFD-3), anteriormente composta por capoeira, passou para agrofloresta de cacau e seringueira em faixas duplas de plantio. A quarta área (CA-4) era com agrofloresta de cacau em sistema cabruca aberta. A quinta área (CS-5), em agrofloresta de cacau e seringueira com 40 anos de uso. A sexta área (PA-6) corresponde ao pasto não fertilizado com 30 anos de uso. A sétima área (CSFD-7), anteriormente composta por pasto, passou para agrofloresta de cacau e seringueira em faixas duplas de plantio. A oitava área (CF-8) era com agrofloresta de cacau em sistema cabruca fechada. A nona área (FM-9) era formada por um fragmento de mata nativa.

As agroflorestas de cacau recebem adubação anual, segundo cada cobertura e sua densidade de plantio, como exposto na Tabela 1, exceto para as áreas comparativas de pasto e fragmento de mata nativa. Quatro coletas de amostras de solo foram realizadas entre as linhas de plantios na profundidade de 0 – 10 cm em uma área útil de 30 x 30 m, onde foi demarcada a parte central de cada sistema de plantio com a finalidade de descartar o efeito de borda, para as áreas CFSD-3 e CFSD-7 foram coletadas quatro amostras em cada faixa num total de oito coletas.

Tabela 1 - Fertilização anual da cobertura vegetal em diferentes agroflorestas de cacau e seringueira na Bahia, Brasil.

Coberturas	Cacau	^a Sombra	N	^b P	^c K
	árvores ha-1		kg ha-1		
CA-4	1111	161	39,6	59,4	11,0
CF-8	1250	175	43,2	52,8	43,2
CE-2	1111	16	43,2	43,2	43,2
CS-1	1111	222	30,8	59,4	19,8
CS-5	1600	175	43,2	43,2	40
CSFD-3	784	440	39,6	60,0	39,6
CSFD-7	833	400	38,4	57,6	38,4
PA-6	-	-	-	-	-
FM-9	-	-	-	-	-

^aComposição de árvores de sombra de acordo com cada agrofloresta; ^bP₂O₅; ^cK₂O.

3.2. Determinação das propriedades do solo

As amostras de solo foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm. O teor de argila foi aferido pelo método da pipeta adicionando-se NaOH a 1 mol L⁻¹ e água destilada. O pH do solo foi obtido pela suspensão em água destilada de acordo com EMBRAPA (1999). O carbono e o nitrogênio total foram determinados por combustão seca com sistema analisador elementar automatizado (CHNS/O *analyser*). O fósforo total (P-total) se deu por digestão de 5 g de solo macerado em H₂SO₄ + H₂O₂, como proposto por Hedley et al. (1982).

3.3. Fracionamento do fósforo do solo

As amostras de solo de cada cobertura foram analisadas pela metodologia proposta por Hedley et al. (1982), conforme a Figura 2, iniciando com a pesagem de 0,5 g de solo em tubos falcon de 15 ml, adicionando-se 10 ml de água deionizada e uma resina trocadora de ânions com dimensões de 1 x 5 cm (ANION 204UZRA) (fração inorgânica de P prontamente disponível as plantas) e levada para agitador horizontal a 120 rpm por 16 horas. Logo após retirada a resina e colocada em tubo falcon de 15 ml e adicionado 10 ml de HCl 0,5 mol L⁻¹ que após descanso e agitação, reservou-se o extrato para determinação, o solo foi centrifugado a 6000 rpm por 20 minutos e o sobrenadante descartado. Seguidamente foi adicionado 10 mL de NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ a pH 8,5 (fração orgânica e inorgânica de P lábil) seguiu para agitação por 16 horas em agitador horizontal a 120 rpm; logo após, seguiu para centrifugar a 6000 rpm por 20 minutos, reservou o sobrenadante (extrato), sendo depois adicionado mais 5 ml de NaCl 0,5 mol L⁻¹ proveniente de mais uma agitação a 6000 rpm por 5 minutos, completando o extrato final.

Para a extração das formas pouco lábeis de P, seguiu-se a adição de 10 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ no solo remanescente (fração orgânica e inorgânica de P ligados com maior energia a Fe e Al) e repetiram-se as mesmas etapas posteriores à extração com NaHCO₃; seguiu-se a adição de 10 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ adicionado de ultrassonificação por 2 minutos (fração orgânica e inorgânica de P ocluso em agregados) e repetiram-se as mesmas etapas posteriores à extração com NaHCO₃.

Para a quantificação do P ligado ao Ca foi adicionado 10 mL de HCl 1,0 mol L⁻¹ e repetiram-se as etapas posteriores a extração com NaHCO₃; a digestão do solo residual se deu por H₂SO₄ + H₂O₂ (P residual – não disponível a curto prazo) em bloco digestor.

O fósforo total (Pt) para cada fração de NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹, NaOH 0,1 mol L⁻¹ e NaOH 0,1 mol L⁻¹ adicionado de ultrassonificação foram determinados, reservando-se uma alíquota do extrato proveniente das etapas iniciais de extração que foram submetidas ao autoclave à 121°C e 103 KPa por 3 horas adicionando-se 1 mL de H₂SO₄ 24 mol L⁻¹ e 10 ml de (NH₄)₂S₂O₈. Os extratos das frações inorgânicas e fósforo residual (P-residual) foram analisados pela

metodologia proposta por Murphy e Riley (1962) e as frações de Pt pela metodologia proposta por Dick e Tabatabai (1977), após o ajuste do pH, usando p-nitrofenol como indicador. O P_o foi calculado por diferença entre as concentrações de Pt e P_i .

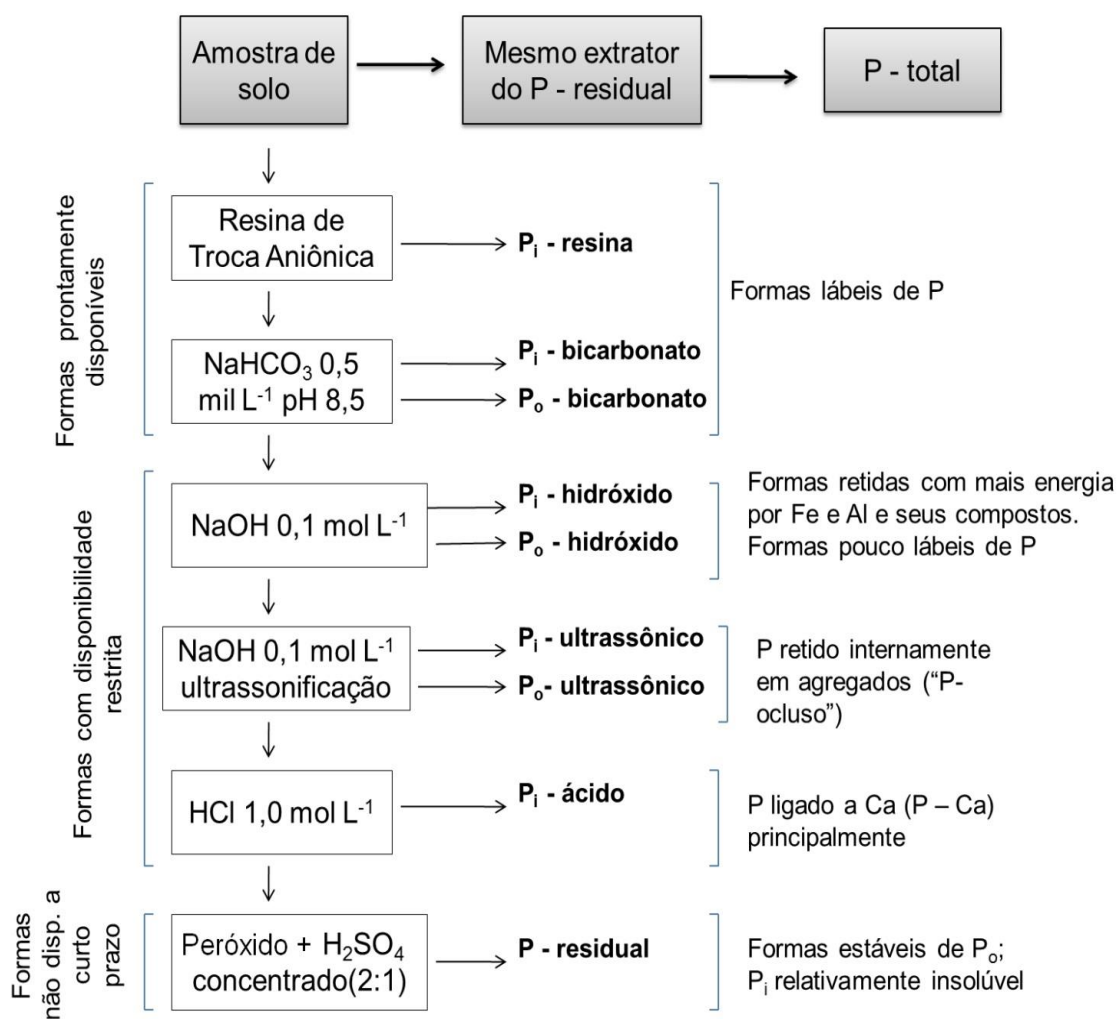


Figura 2 - Fracionamento de fósforo pelo método de Hedley et al. (1982). Fonte: Novais e Smith (1999) - modificado.

3.4. Análise estatística

A distribuição das frações de fósforo em sistemas agroflorestais de cacau (*Theobroma cacao* L.) com diferentes coberturas e manejo do sistema foi submetida ao teste de normalidade e logo após a ANOVA, aplicado o teste de

agrupamento de médias de “*Scott-Knott*” ao nível de 5% de probabilidade, com uso do software SAEG 9.1. Correlações de Pearson foram estabelecidas entre as frações de fósforo.

Usou-se a análise de componentes principais (PCA) que possibilita agrupar as coberturas por similaridade de acordo com o conjunto de características e identificar as relações entre dados obtidos, buscando padrões de distribuição das frações de fósforo no solo dos agrossistemas e áreas comparativas. Aplicou-se aos dados a análise de regressão múltipla a técnica *backward*, onde a fração Pi-resina torna-se uma variável dependente e as outras frações tornam-se variáveis independentes com o uso do software STATISTICA 10.1 (StatSoft, Inc). A análise de trilha foi usada para avaliar as inter-relações entre a fração de Pi-resina e as frações selecionadas através do coeficiente de correlação em efeitos diretos e indiretos para a análise.

A modelagem de equações estruturais (SEM) foi usada a fim de correlacionar variações entre Pi e Po com o *pool* disponível de P no solo com o uso do software AMOS v.19 (IBM; SPSS Inc., Chicago, IL, USA). O ajuste do modelo gerado se deu através do teste do qui-quadrado (χ^2); do índice de qualidade de ajuste (GFI) que é um índice que possui pouca sensibilidade ao tamanho amostral; do índice de ajuste comparativo (CFI) que é um índice de ajuste complementar; da raiz do erro quadrático médio de aproximação (RMSEA) que é um índice de má qualidade de ajuste em contraste aos índices de melhor ajuste e critério de informação de Akaike (AIC). Para o teste de χ^2 a hipótese nula não foi rejeitada (valores de $p < 0,05$), para que o modelo pudesse obter melhor ajuste. Para RMSEA, os valores menores que 0,07 sugerem um ajuste adequado do modelo. De forma semelhante ocorre para o índice AIC, onde o modelo escolhido será o que obtiver o menor valor. Para os índices GFI e CFI o critério de aceite é estar acima de 0.95 para que seja indicativo de ajuste ideal (Hooper et al., 2008).

4. RESULTADOS

4.1. Propriedades do solo

As propriedades químicas e físicas dos solos das áreas amostradas estão expostas na Tabela 2. A concentração de argila variou de 36,0 a 65,9% na camada de 0-10 cm. O pH do solo das áreas variou de 4,0 a 4,8. Os estoques de carbono total (C) variaram de 27,3 a 39,9 g Kg⁻¹ e o nitrogênio total (N) de 2,3 a 4,7 g Kg⁻¹. O P-total presente nos solos variou de 505 a 1300 mg P kg⁻¹ e devido à amostragem ter sido realizada cerca de seis meses após a aplicação de adubos fosfatados, a agrofloresta CS-5 apresentou o maior valor para esse atributo do solo. A relação C:N variou de 7,27 a 13,0 entre as áreas. A relação C:Po mostrou uma variação de 94,4 a 163,2 entre as coberturas amostradas.

4.2. Concentração das frações de fósforo do solo

As frações de fósforo em solos das agroflorestas de cacau com seringueira em faixas duplas de plantio estão descritas na Tabela 3. Os valores de fósforo na agrofloresta CSFD-3 em faixas de seringueira foram superiores tanto em frações de Pi quanto em Po sobre as faixas de cacau. As concentrações de fósforo extraído com a resina trocadora de ânions nas faixas de cacau foram inferiores às da seringueira. O Pi extraído com NaHCO₃ apresentou concentrações inferiores para o cacau em comparação a seringueira, a porção

orgânica da fração NaHCO_3 do cacau e seringueira acompanhou a relação entre as faixas encontradas em Pi-NaHCO_3 . A cobertura CSFD-7 apresentou resultados semelhantes em todos os atributos a CSFD-3, tanto na faixa dupla de seringueira quanto na faixa dupla de cacau.

Tabela 2 - Caracterização física e química em solos na profundidade de 0 – 10 cm em diferentes coberturas na Bahia, Brasil.

Coberturas	Argila	pH	^a C	^a N	^a P	C:N	^b C:Po
	%		g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹		
CA-4	52,7	4,1	34,2	4,7	680	7,2	148,5
CF-8	52,8	4,5	33,4	3,9	680	8,4	145,5
CE-2	65,9	4,5	37,2	4,2	830	8,8	94,4
CS-1	61,8	4,0	35,6	4,7	500	7,5	163,2
CS-5	62,0	4,3	30,8	3,5	1300	8,6	133,9
CSFD-3	40,3	4,5	30,8	2,3	490	13,0	126,9
CSFD-7	36,0	4,8	27,3	3,3	600	8,2	121,7
PA-6	44,7	4,6	35,9	4,2	680	8,5	146,1
FM-9	60,3	4,5	39,9	4,7	630	8,4	145,8

^aC: Carbono total, N: Nitrogênio total, P: Fósforo total (digestão sulfúrica). ^bPo: fósforo orgânico total.

O fracionamento de fósforo do solo entre as nove diferentes áreas pode ser visto na Tabela 4. A fração Pi-resina apresentou concentrações que variaram de 2,54 a 25,23 mg P kg⁻¹. As agroflorestas CS-1 e CA-4 apresentaram concentrações iguais de Pi-resina, os valores das agroflorestas CF-8 e CE-2 não divergiram estatisticamente entre si. Os menores valores foram encontrados em FM-9 e PA-6. O Po- NaHCO_3 superou em todas as coberturas o Pi- NaHCO_3 , com exceção da agrofloresta CS-5. Quanto às frações inorgânicas de NaHCO_3 , foram similares às concentrações para as agroflorestas CA-4, CF-8, CS-1 e CSFD-3 que

variaram de 8,0 a 8,6 mg P kg⁻¹, o Po apresentou estatisticamente semelhanças nas concentrações em oito coberturas com valores variando de 19,2 a 31,7 mg P kg⁻¹.

Analisando na Tabela 4 as frações de fósforo extraídas com NaOH, nota-se que as frações orgânicas superaram as inorgânicas amplamente, exceto a agrofloresta CS-5, onde a concentração de Pi foi superior a Po. As agroflorestas CSFD-3 e CSFD-7 apresentaram valores estatisticamente iguais para a Pi-NaOH; seguidamente CS-1, CA-4 e CF-8 apresentaram valores estatisticamente iguais de Pi variando entre 67,6 a 74,2 mg kg⁻¹. Para Po-NaOH, a agrofloresta CE-2 apresentou maior estoque na fração, sendo as áreas comparativas PA-6 e FM-9 inferiores apenas à agrofloresta CE-2 em suas concentrações. As demais coberturas não divergiram estatisticamente entre si com concentrações entre 90,1 a 114,7 mg kg⁻¹ de Po-NaOH.

Para a fração extraída com NaOH+Ultrassom, todas as áreas apresentaram concentrações superiores de Po em relação ao Pi, exceto para CS-5. A agrofloresta CE-2 foi a que apresentou as maiores concentrações de Pi, já as áreas CS-1, CSFD-3, CSFD-7 e PA-6 apresentaram valores intermediários e semelhantes entre si que variaram de 27,9 a 34,0 mg kg⁻¹ em Pi NaOH+Ultrassom. A fração Po-NaOH+Ultrassom variou de 80,2 a 116,2 mg P kg⁻¹, as maiores concentrações foram observadas em CA-4, CF-8 e FM-9 que não diferiram estatisticamente entre si. As demais áreas apresentaram concentrações estatisticamente semelhantes que variaram de 80,2 a 98,2 mg kg⁻¹ de Po NaOH+Ultrassom.

A fração Pi-HCl variou de 3,7 a 4,6 mg P kg⁻¹, a maior concentração foi observada em CS-5, sendo em FM-9 a segunda maior concentração, as demais áreas não apresentaram diferenças estatísticas com concentrações entre 3,7 a 4,3 mg P kg⁻¹. A fração P-residual apresentou maior concentração na agrofloresta CS-5 ao passo que as menores concentrações foram encontradas nas agroflorestas CSFD-3 e CFSD-7.

Tabela 3 - Frações de fósforo inorgânico e orgânico em solos na profundidade de 0 – 10 cm em faixas duplas de agrofloresta (CSFD-3 e CSFD-7) de cacau e seringueira na Bahia, Brasil.

	Pi-resina	Pi-NaHCO ₃	Po-NaHCO ₃	Pi-NaOH	Po-NaOH	Pi-NaOH Ultra	Po-NaOH Ultra	Pi-HCl	P-residual	^a ΣPi	^b ΣPo	P-total
Coberturas	mg P kg ⁻¹											
<i>CSFD-3</i>												
Cacau	5,3C	7,5C	21,3B	81,7B	77,7B	27,5C	61,8C	3,8B	238,3D	125,8C	160,9B	525,1B
Seringueira	6,6B	9,8B	40,9A	95,9A	151,8A	34,0B	131,7 ^a	4,8A	332,2B	151,4B	324,5A	808,1A
<i>CSFD-7</i>												
Cacau	6,8B	9,8B	21,2B	82,0B	63,9B	23,8D	53,7C	3,5B	267,5C	126,1C	138,9B	532,6B
Seringueira	7,7A	11,8A	42,1A	94,9A	160,6A	44,1A	106,7B	5,2A	355,2A	163,9A	309,5A	828,7A
Médias	6,6	9,7	31,4	88,6	113,5	32,4	88,5	4,3	298,3	141,8	233,4	673,6
CV(%)	3,8	7,8	4,3	2,7	22,1	4,8	8,2	8,0	3,7	1,9	11,6	3,9

*Médias seguidas por letras iguais pertencem ao mesmo grupo pelo procedimento de "Scott-Knott" a 5% de probabilidade. ^aPi-resina + Pi-NaHCO₃ + Pi-NaOH + Pi-NaOH Ultra + Pi-HCl; ^bPo-NaHCO₃ + Po-NaOH + Po-NaOH Ultra.

Tabela 4 - Frações de fósforo inorgânico e orgânico em solos na profundidade de 0 – 10 cm em diferentes coberturas na Bahia, Brasil.

	Pi-resina	Pi-NaHCO ₃	Po-NaHCO ₃	Pi-NaOH	Po-NaOH	Pi-NaOH Ultra	Po-NaOH Ultra	Pi-HCl	P-residual	^a ΣPi	^b ΣPo	P-total
Coberturas	mg P kg ⁻¹											
CA-4	6,4C	8,0D	19,2B	71,9C	94,8C	24,6D	116,2A	4,6C	373,7B	115,6D	230,3B	719,7B
CF-8	4,8E	8,4D	19,8B	67,6C	93,6C	23,7D	116,0A	3,7C	384,6B	108,4D	229,5B	722,5B
CE-2	5,5E	18,7B	26,3B	60,3D	269,2 ^a	71,8B	98,2B	4,6C	440,5A	161,0B	393,8A	995,5A
CS-1	6,4C	9,4D	24,7B	74,2C	99,8C	27,9C	93,4B	3,7C	335,7C	120,7D	218,1B	674,6B
CS-5	25,2A	55,0A	54,3A	97,0A	90,1C	96,7 ^a	85,4B	5,7A	442,3A	279,6A	230,0B	952,2A
CSFD-3	5,9D	8,6D	31,1B	88,8B	114,7C	30,7C	96,7B	4,7C	285,2D	138,6C	242,7B	666,6B
CSFD-7	7,2B	10,8C	31,7B	88,4B	112,2C	34,0C	80,2B	4,3C	311,4D	145,0C	224,2B	680,6B
PA-6	2,5G	6,2E	23,8B	52,2E	141,3B	30,0C	80,5B	4,1C	328,6C	95,1E	245,6B	669,4B
FM-9	3,5F	3,1F	21,9B	61,7D	140,2B	23,6D	111,4A	4,9B	346,6C	96,9E	273,6B	717,2B
Médias	7,4	14,2	28,1	73,6	128,5	40,3	97,6	4,4	360,9	140,1	254,2	755,4
CV(%)	6,3	10,5	31,5	8,8	20,1	10,8	17,9	14,5	8,0	7,1	18,4	10,5

*Médias seguidas por letras iguais pertencem ao mesmo grupo pelo procedimento de “*Scott-Knott*” a 5% de probabilidade. ^aPi-resina + Pi-NaHCO₃ + Pi-NaOH + Pi-NaOH Ultra + Pi-HCl; ^bPo-NaHCO₃ + Po-NaOH + Po-NaOH Ultra.

4.3. Fósforo Total Inorgânico e Orgânico

O somatório das frações inorgânicas de fósforo (ΣPi) para as agroflorestas de cacau com seringueira em faixas duplas apresentaram concentrações que variaram de 125,8 a 163,9 mg P kg⁻¹ (Figura 3) com concentrações semelhantes estatisticamente para as faixas de cacau em CSFD-3 e CSFD-7. Para a análise de ΣPi em relação às nove áreas amostradas, a concentração variou de 95,1 a 279,6 mg P kg⁻¹ (Figura 4), o maior valor obtido foi observado para a agrofloresta CS-5, tendo em vista uma possível interferência da adubação; as coberturas CA-4 e CF-8 estatisticamente demonstraram iguais concentrações, assim como CSFD-3 com CSFD-7, as áreas comparativas PA-6 e FM-9 que não sofrem adubação, possuem concentrações estatisticamente iguais de ΣPi .

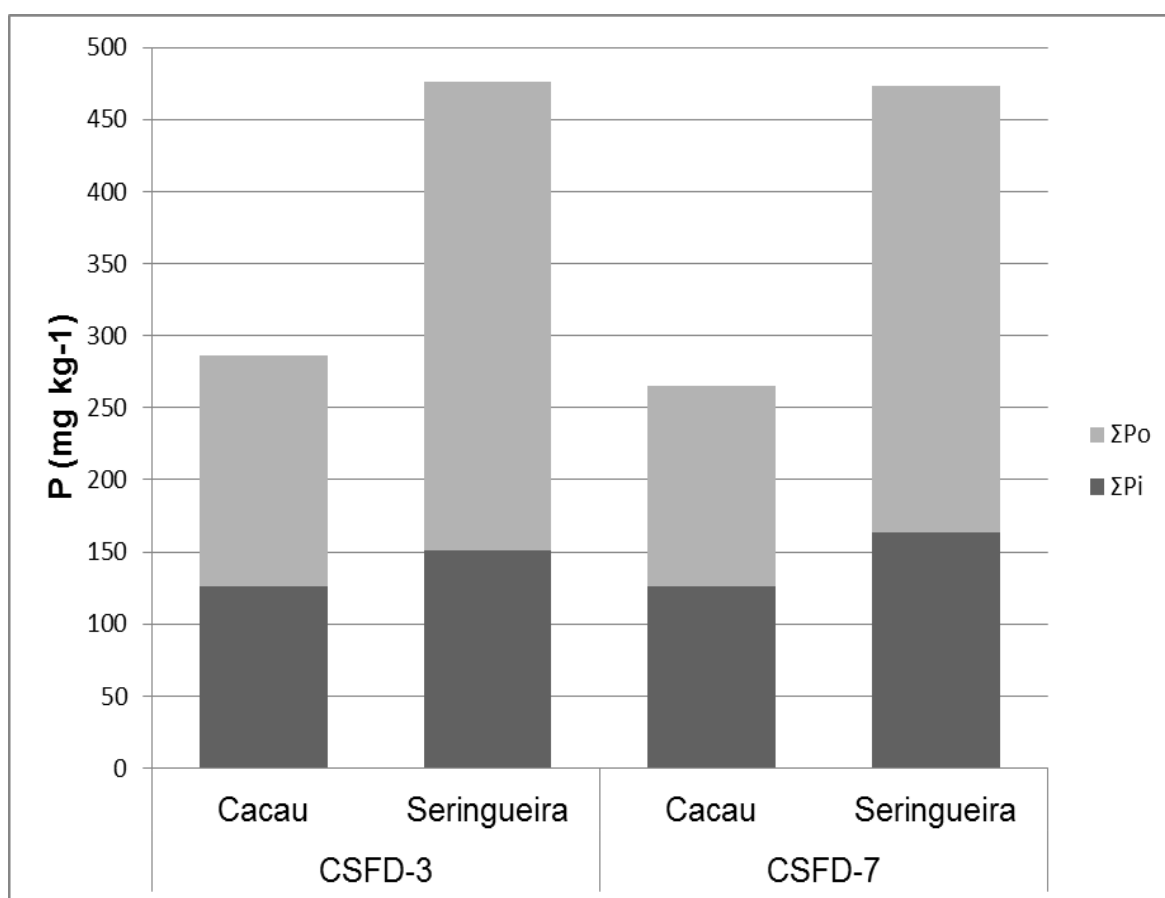
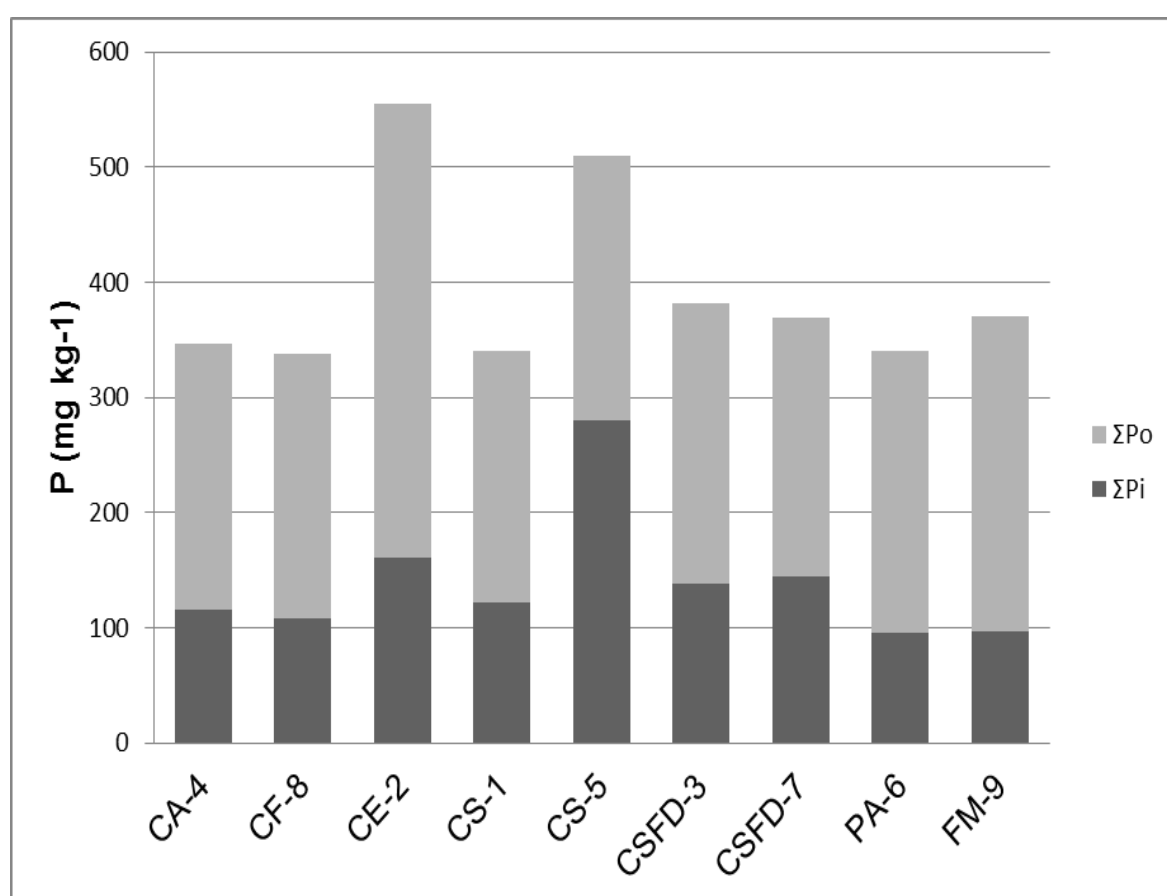


Figura 3 - Totais de fósforo inorgânico e orgânico em solos na profundidade de 0 – 10 cm em faixas duplas de agrofloresta (CSFD-3 e CSFD-7) de cacau e seringueira na Bahia, Brasil.

O total das frações orgânicas de fósforo (ΣPo) para as agroflorestas de cacau com seringueira em faixas duplas apontaram concentrações entre 106,9 e 324,5 mg P kg⁻¹ (Figura 3) com proporções estatisticamente semelhantes para as faixas de cacau, bem como nas faixas de seringueira entre CSFD-3 e CSFD-7. O ΣPo levando em conta as nove áreas amostradas apresentou concentrações que variaram de 224,2 a 393,8 mg P kg⁻¹ (Figura 4), a agrofloresta CS-5 foi a com maior concentração, as demais coberturas não demonstraram diferenças estatísticas entre as concentrações de ΣPo .



Figuras 4 – Totais de fósforo inorgânico e orgânico em solos na profundidade de 0 – 10 cm em diferentes coberturas na Bahia, Brasil.

4.4. Proporções das frações de fósforo do solo

A distribuição das frações de fósforo para as agroflorestas de cacau com seringueira em faixas duplas (CSFD-3 e CSFD-7) pode ser analisada na Tabela 3.

O P-lábil (Pi-resina + Pi-NaHCO₃ + Po-NaHCO₃) expressou teores variando entre 6,4 e 7,4% em relação ao fósforo total do solo. As concentrações de P-mod.lábil (Pi-NaOH + Po-NaOH) variaram seu teor entre 27,4 e 30,8%. A extração do P-ocluído (Pi-NaOH+Ultrassom + Po-NaOH+Ultrassom) apontou percentuais de acumulação entre 14,5 e 20,5%. O P-Ca (Pi-HCl) teve percentuais entre 0,6 e 0,7%, resultado este esperado, em se tratando de solos altamente intemperizados. A fração mais recalcitrante e insolúvel de fósforo possui teores entre 41,1 e 50,2% de P-insolúvel (P-residual). As faixas com cobertura de seringueira apresentaram maiores concentrações que as faixas de cacau em todas as frações de fósforo encontradas no solo, entretanto as faixas de cacau tiveram maior percentual de acumulação de P-insolúvel em relação à seringueira.

As concentrações das frações de fósforo no solo para as nove áreas analisadas estão expostas na Tabela 4. A concentração do P-lábil apresentou percentuais entre 3,9 e 14,1% do total do fósforo presente no solo, à cobertura CS-5 obteve o maior percentual. O P-mod.lábil apresentou teores entre 19,6 e 33,1%. O P-ocluído possui percentuais entre 16,5 e 19,5% do fósforo extraído do solo. O P-Ca obteve proporções de 0,4 a 0,6%. O P-insolúvel apresentou percentuais acumulados entre 42,7 e 53,2% do fósforo total.

4.5. Análise de componentes principais

Com o estabelecimento de padrões por análise de componentes principais (PCA) para frações de fósforo do solo em nove diferentes áreas puderam ser explicadas por 50,19 e 22,12% do total de variação dentro do conjunto de dados (Tabela 5). As frações Pi-resina, Pi-NaHCO₃, Po-NaHCO₃, Pi-NaOH, Pi-NaOH+Ultrassom, Pi-HCl e P-residual apresentaram correlação com primeiro componente do diagrama de ordenação do PCA; as frações Po-NaOH e Po-NaOH+Ultrassom correlacionaram-se com o segundo componente do diagrama (Figura 5).

O diagrama de ordenação do PCA para as diferentes áreas amostradas (Figura 6) indica que os pontos mais distantes da origem do eixo tornam-se as áreas com maior representatividade para com as cargas fatoriais, assim podemos colocar que CS-5 possui alta dissimilaridade, o mesmo pode ser atribuído a CE-2. As áreas CA-4, CF-8, FM-9 e PA-9 estão agrupadas pela análise, assim como as

faixas duplas cacau e seringueira de CSFD-3 e CFSD-7 possuindo alta similaridade.

Tabela 5 - Resultados de PCA para frações de fósforo em solos na profundidade de 0 – 10 cm em diferentes coberturas na Bahia, Brasil.

Frações	Componente 1	Componente 2
	(50,19%)	(22,12%)
Pi-resina	-0,89	0,35
Pi-NaHCO ₃	-0,91	0,20
Po-NaHCO ₃	-0,85	0,11
Pi-NaOH	-0,55	0,52
Po-NaOH	-0,18	-0,82
Pi-NaOH Ultra	-0,89	-0,08
Po-NaOH Ultra	-0,14	-0,66
Pi-HCL	-0,73	-0,24
P-residual	-0,66	-0,59

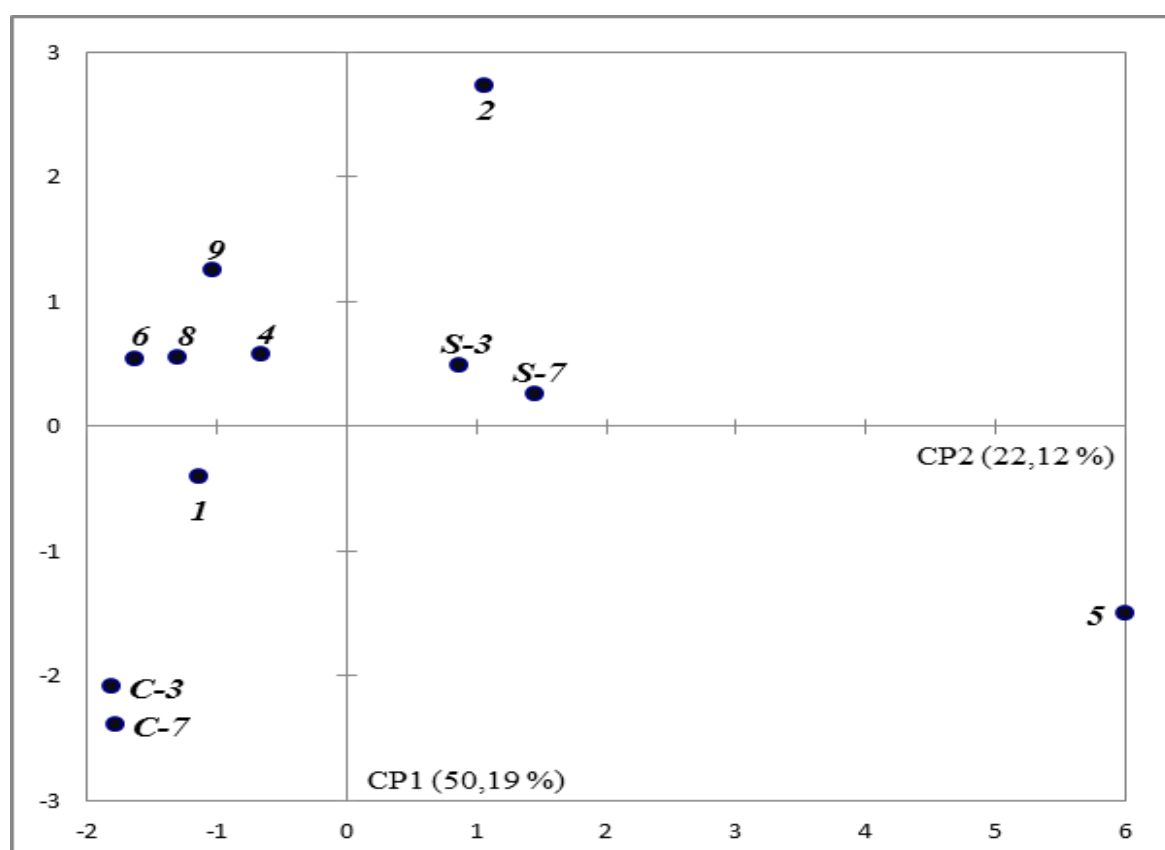


Figura 5 - Diagrama de ordenação baseado em PCA em diferentes coberturas na Bahia, Brasil. 1: CS-1, 2: CE-2, 4: CA-4, 5: CS-5, 6: PA-6, 8: CF-8, 9: FM-9, C3: Cacau, C7: Cacau, S3: Seringueira, S7: Seringueira.

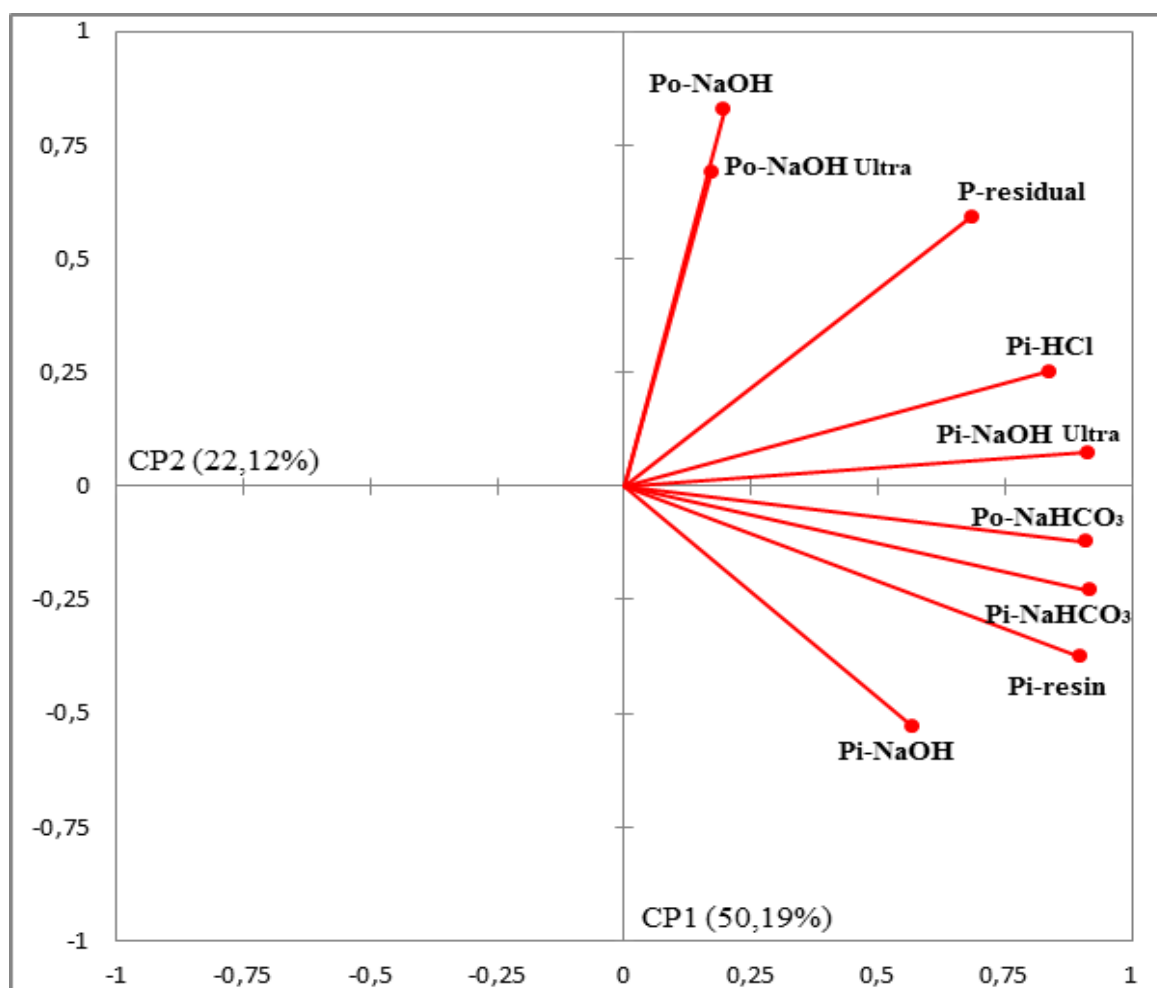


Figura 6 - Diagrama de ordenação baseado em PCA de frações de fósforo do solo em diferentes coberturas na Bahia, Brasil.

4.6. Correlação entre as frações de fósforo do solo

A análise dos coeficientes de correlação entre as amostras de solo ilustrados na Tabela 6, demonstraram que o Pi-resina correlacionou-se positivamente com as frações inorgânicas de NaHCO₃, NaOH, NaOH+Ultrassom e HCl, com uma dinâmica efetiva de contribuição de diversos compartimentos em diferentes graus de labilidade; houve ainda correlação de Pi-resina com a fração orgânica extraída com NaHCO₃.

A fração Pi-NaHCO₃ apresentou correlação com as frações Po-NaHCO₃ e Pi-NaOH+Ultrassom e Pi-HCl. O Po-NaHCO₃ apresentou correlação com Pi-NaOH, Pi-NaOH+Ultrassom e Pi-HCl. A fração Pi-NaOH+Ultrassom correlacionou-se com a fração Pi-HCl e o P-residual.

Tabela 6 - Matriz de correlação de Pearson entre as frações de fósforo inorgânico e orgânico em solos na profundidade de 0 – 10 cm em diferentes coberturas na Bahia, Brasil (N=9).

	Pi-NaHCO ₃	Po-NaHCO ₃	Pi-NaOH	Po-NaOH	Pi-NaOH Ultra	Po-NaOH Ultra	Pi-HCl	P-residual
Pi-resina	0,96***	0,92***	0,71*	-0,29	0,81**	-0,31	0,74*	0,53
Pi-NaHCO ₃		0,91***	0,57	-0,06	0,92***	-0,35	0,73*	0,66
Po-NaHCO ₃			0,74*	-0,16	0,82**	-0,56	0,71*	0,33
Pi-NaOH				-0,49	0,38	-0,29	0,40	-0,05
Po-NaOH					0,31	-0,05	0,04	0,35
Pi-NaOH Ultra						-0,38	0,71*	0,74*
Po-NaOH Ultra							-0,13	0,17
* Pi-HCl								0,49

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

4.7. Regressão múltipla e análise de trilha

Através de regressão múltipla utilizando a técnica *backward* amostrado na Tabela 7, a observação foi feita para o valor do teste *t* de média, com a finalidade de ajustar o modelo e reduzir a soma de quadrados de erro. Assim, as frações Pi-NaHCO₃, Po-NaHCO₃, Pi-NaOH, Pi-NaOH+Ultrassom, Po-NaOH+Ultrassom, Pi-HCl e P-residual foram identificadas como estatisticamente significativas em relação a fração Pi-resina.

Com a análise de trilha (Tabela 8) conseguimos resultados significativos das frações sobre Pi-resina. O Pi-NaHCO₃ apresentou efeitos diretos positivos, e o Po-NaOH efeitos diretos negativos. As frações Po-NaHCO₃, Pi-NaOH, Pi-NaOH+Ultrassom, Pi-HCl e P-residual apresentaram efeitos indiretos positivos via Pi-NaHCO₃ para com Pi-resina. A fração Po-NaOH+Ultrassom não foi significativa.

Tabela 7 - Análise de regressão múltipla de P do solo em diferentes frações.

Frações	Coefficientes de regressão	β (efeitos diretos)
Pi-NaHCO ₃	0,52511	1,22
Po-NaHCO ₃	-0,53080	-0,10
Pi-NaOH	0,81086	0,20
Pi-NaOH Ultra	-0,13112	-0,51
Po-NaOH Ultra	-0,24402	-0,09
Pi-HCl	0,18033	0,21
P-residual	0,84798	0,08

$R^2 = 0,99$ ($p < 0,05$); $U = 0,1$

Tabela 8 - Análise de trilha com efeitos diretos (diagonal, negrito) e efeitos indiretos (fora da diagonal) de diferentes frações de P sobre Pi-resina em diferentes coberturas na Bahia, Brasil.

	Pi-NaHCO ₃	Po-NaHCO ₃	Pi-NaOH	Po-NaOH	Pi-NaOH Ultra	Po-NaOH Ultra	Pi-HCl	P-residual	<i>r</i>
Pi-NaHCO ₃	0,76*	-0,01	0,06	<0,01	0,09	>-0,01	0,03	0,01	0,94
Po-NaHCO ₃	0,51*	-0,17	0,09	-0,02	0,06	<0,01	0,04	<0,01	0,53
Pi-NaOH	0,54*	-0,01	0,13	0,06	0,03	<0,01	0,02	>-0,01	0,77
Po-NaOH	-0,01	>-0,01	-0,03	-0,23*	0,03	0,01	0,01	0,01	-0,22
Pi-NaOH Ultra	0,69*	-0,01	0,04	-0,08	0,10	>-0,01	0,03	0,01	0,77
Po-NaOH Ultra	-0,1	>-0,01	<0,01	-0,08	>-0,01	0,04	0,02	0,01	-0,12
Pi-HCl	0,38*	-0,01	0,04	-0,06	0,05	0,01	0,06	0,01	0,48
P-residual	0,43*	>-0,01	-0,01	-0,11	0,07	0,02	0,03	0,02	0,44

$R^2 = 0,97$ (* $p < 0,05$); $U = 0,14$

4.8. Modelagem de equações estruturais (SEM)

A partir dos dados coletados foi possível a construção de três modelos que visam explicar a dinâmica do fósforo em solos tropicais. Os índices de ajuste dos modelos mais destacados por Grace (2006), Byrne (2009) e Hair et al. (2009) como o χ^2 , *df*, *p*, GFI, CFI, RMSEA e AIC estão apresentados na Tabela 9. O modelo hipotético 1 (Figura 7) construído através da metodologia SEM para as sete agroflorestas (CS-1, CE-2, CSFD-3, CA-4, CS-5, CSFD-7 e CF-8) somadas às duas áreas comparativas (PA-6 e FM-9), foi ajustado teoricamente de acordo com os padrões dos índices de ajuste para a dinâmica de P no solo, onde as frações inorgânicas de P possuem uma relação direta com o *pool* disponível e, conseqüentemente, com o Pi-resina. As frações Pi-NaHCO₃, Pi-NaOH e Pi-HCl atuaram como fonte de P diretamente para o *pool* disponível enquanto Pi-NaOH+Ultrassom atuou como dreno de Pi-resina. As frações Pi-NaOH, Pi-HCl e P-residual ainda atuaram cedendo formas de P à fração Po-NaHCO₃, que por sua vez correlacionou-se com o *pool* disponível de forma indireta por meio da fração Pi-NaHCO₃ passando a ceder fósforo.

Tabela 9 - Parâmetros de ajuste para os modelos de equações estruturais para o ciclo do fósforo em diferentes coberturas na Bahia, Brasil

Modelo	χ^2	<i>df</i>	<i>p</i>	GFI	CFI	RMSEA	AIC
1	*6,90	6	0,330	0,971	0,998	0,431	50,90
2	*12,52	8	0,129	0,939	0,990	0,103	52,52
3	*2,63	4	0,620	0,980	1,000	0,000	36,63

**p*<0,05

O modelo hipotético 2 construído somente com as áreas de agroflorestas, ou seja, áreas que passam por adubação anual, também foi teoricamente ajustado, fugindo apenas dos critérios de ajuste nos índices GFI e RMSEA (Figura 8). O valor de χ^2 foi superior ao dos outros modelos, sendo o nível de probabilidade inferior comparando com os mesmos. Na expectativa de melhorar o

ajuste do Modelo 2, foi retirada a contribuição da fração $Po-NaHCO_3$, no que resultou na construção do modelo hipotético 3 (Figura 9), que atendeu a todos os índices de ajuste, assim sendo o modelo que mais se encaixa com a realidade das agroflorestas adubadas. As frações $Pi-NaHCO_3$, $Pi-NaOH$ e $Pi-HCl$ atuaram cedendo P diretamente para o *pool* disponível enquanto $Pi-NaOH+Ultrassom$ atuou como dreno de Pi -resina, assim como a fração P-residual continuou a ceder fósforo a $Pi-NaHCO_3$ e $Pi-NaOH+Ultrassom$.

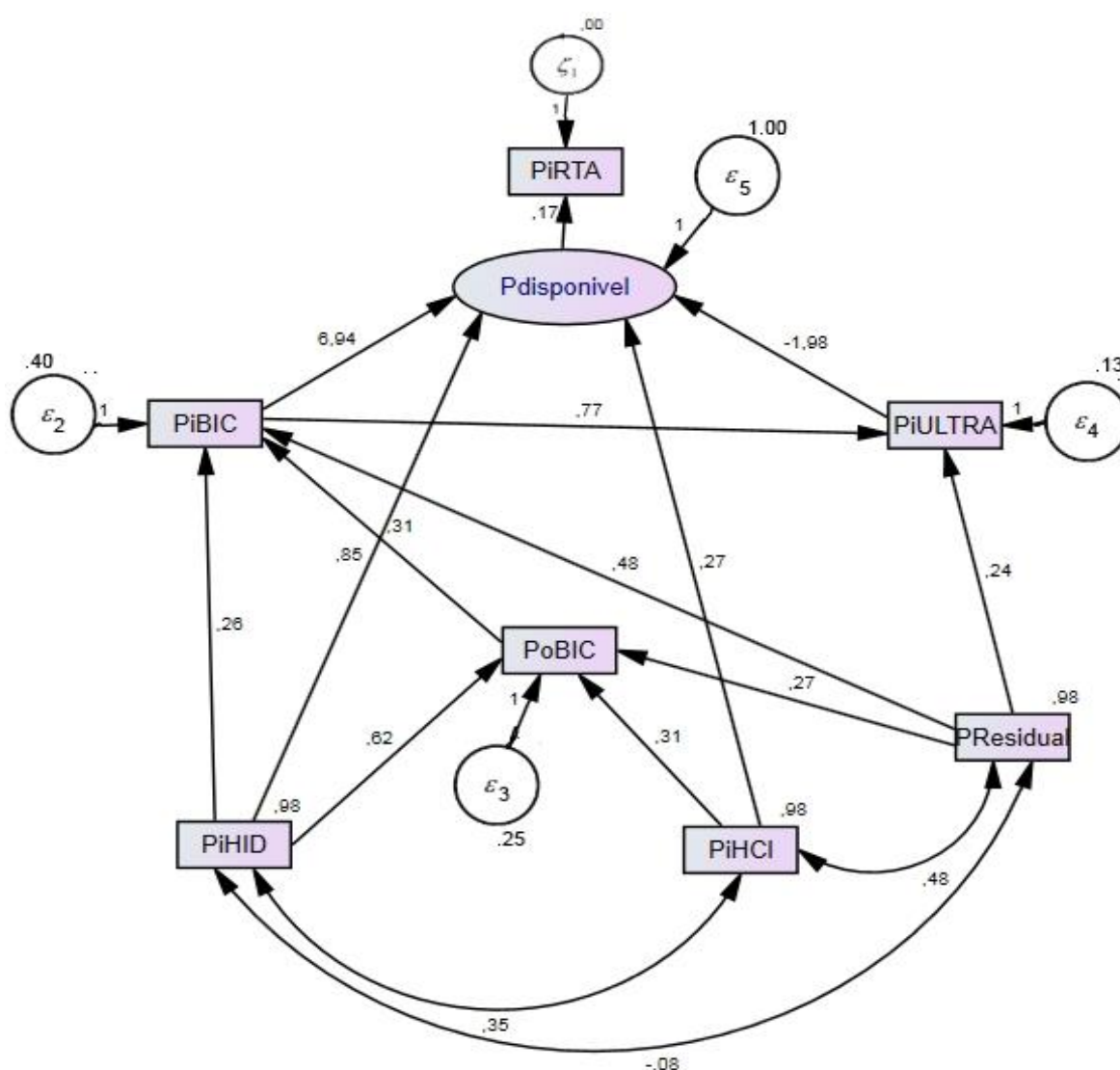


Figura 7 – Modelo hipotético 1 das relações das frações de P (variáveis medidas) para P-disponível (variável latente) a partir do SEM para o ciclo de P no solo sob diferentes coberturas na Bahia, Brasil. Os números correspondem aos parâmetros padronizados estimados ($P < 0,05$) e os valores de R^2 (números acima das caixas $Pi-HID$, $PiHCl$ e $P-Residual$). Variáveis de erro ($\varepsilon_2-\varepsilon_5$ e ζ_1) são valores normalizados.

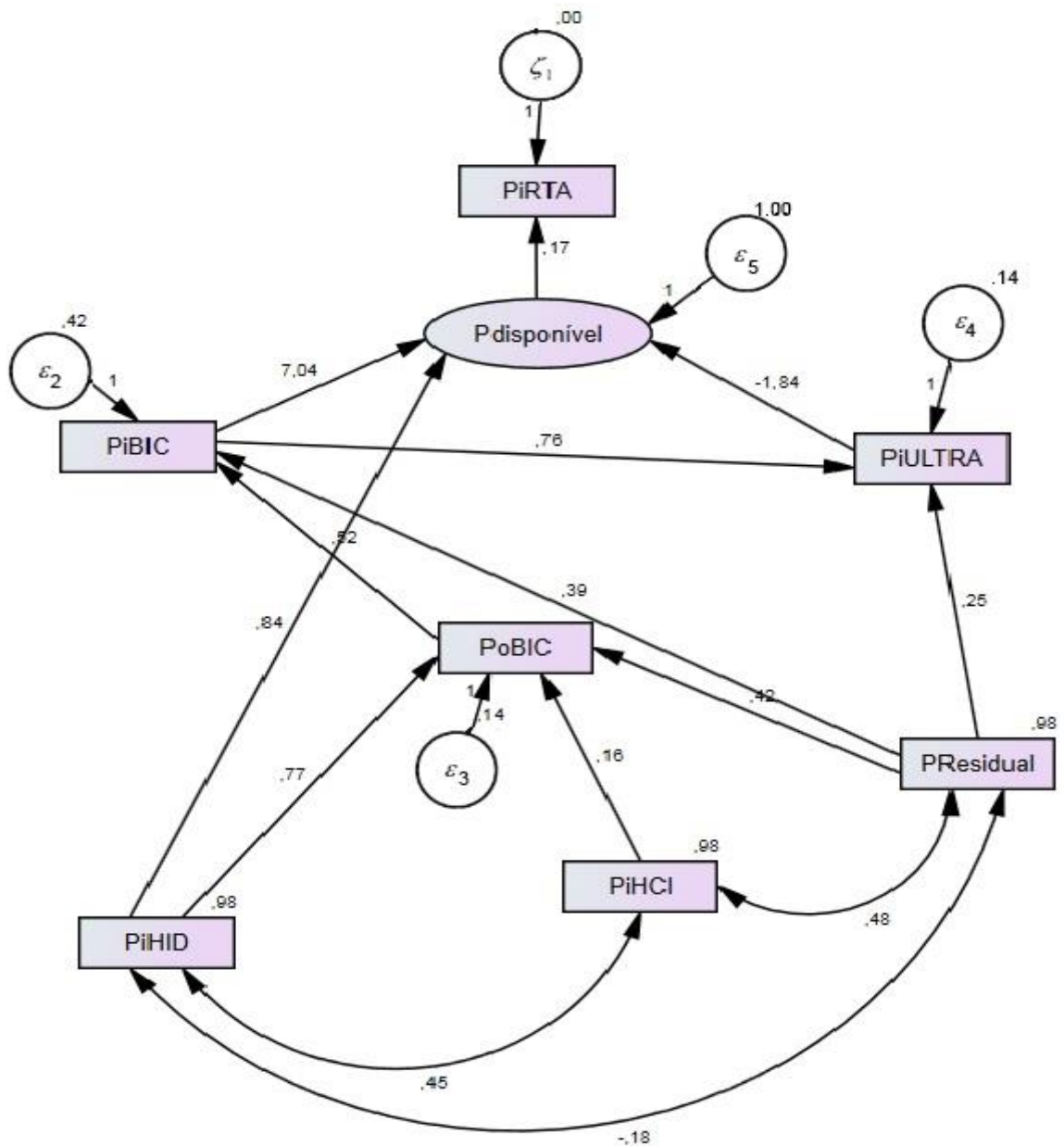


Figura 7 –Modelo hipotético 2 das relações das frações de P (variáveis medidas) para P-disponível (variável latente) a partir do SEM para o ciclo de P no solo sob diferentes agroflorestas de cacau e seringueira sem as áreas comparativas de pasto e mata nativa na Bahia, Brasil. Os números correspondem aos parâmetros padronizados estimados ($P < 0,05$) e os valores de R^2 (números acima das caixas Pi-HID, PiHCl e P-Residual). Variáveis de erro (ε_2 - ε_4 e ζ_1) são valores normalizados.

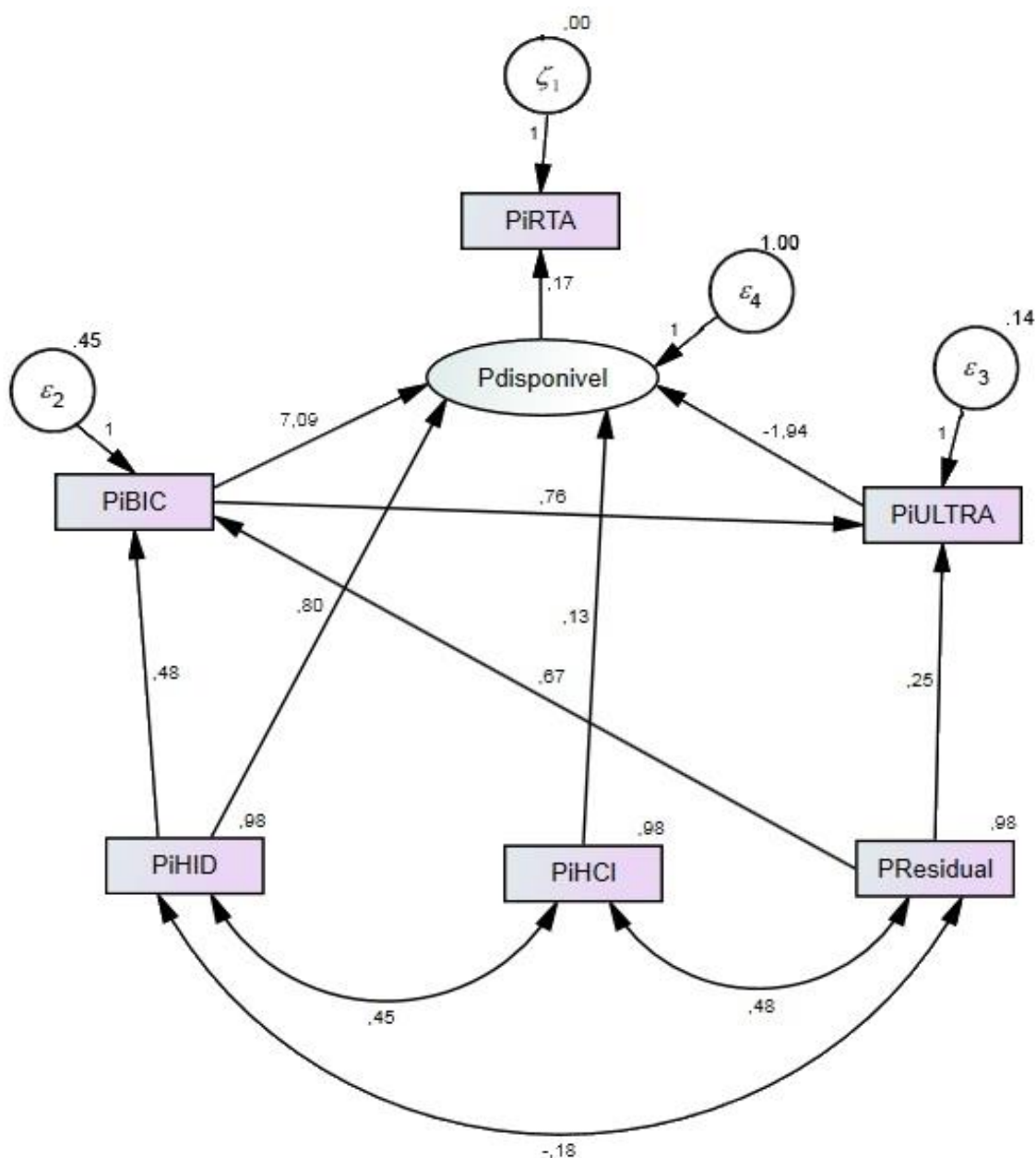


Figura 9 – Modelo hipotético 3 das relações das frações de P (variáveis medidas) para P-disponível (variável latente) a partir do SEM para o ciclo de P no solo sob diferentes agroflorestas de cacau e seringueira sem as áreas comparativas de pasto e mata nativa na Bahia, Brasil. Os números correspondem aos parâmetros padronizados estimados ($P < 0,05$) e os valores de R^2 (números acima das caixas Pi-HID, PiHCI e P-Residual). Variáveis de erro (ϵ_2 - ϵ_4 e ζ_1) são valores normalizados.

5. DISCUSSÃO

5.1. Fracionamento do fósforo no solo

As faixas duplas de cacau de CSFD-3 e CFSD-7 são similares quanto à distribuição das frações de fósforo do solo, o mesmo ocorre nas faixas duplas de seringueira. O histórico das áreas antes da implantação das agroflorestas pouco influenciou na forma de acumulação entre as faixas de plantio, ocorrendo somente diferenças nas frações lábeis de P. Segundo Alamgir et al. (2012), as concentrações de Pi-resina e Pi-NaHCO₃ aumentam em solos com resíduos ricos em formas de fósforo e o decréscimo com a deposição de resíduos pobres em formas de fósforo. Entre as agroflorestas CSFD-3 e CFSD-7 nota-se uma maior eficiência na disponibilidade de P-lábil nas faixas duplas de seringueira e uma maior acumulação de frações orgânicas. A adição de compostos orgânicos ricos em Po (resíduos) pode vir a bloquear as zonas de complexação de Pi em moléculas orgânicas aumentando assim, a oferta de Pi-lábil (Ramirez e Bornemisza, 1990) e Po-lábil da ciclagem mais lenta da MO (Szott e Melendez, 2001), o que pode vir a contribuir positivamente para a adição de fósforo para a cultura do cacau através da ciclagem de resíduos, viabilizando assim a revisão dos métodos adotados na adubação fosfatada para agrossistemas acumuladores de Po. Os menores estoques de P-residual foram encontrados em CSFD-3 e CFSD-7 demonstrando uma baixa acumulação de frações de P não disponíveis.

A agrofloresta CS-5 possui longo tempo de manejo, cerca de 40 anos, e apresentou as maiores concentrações de formas inorgânicas de P em relação às formas orgânicas, o que provavelmente seja reflexo da amostragem próximo à época de adubação anual. Rheinheimer et al. (2008), Carneiro et al. (2011) e Sugihara et al. (2012) afirmam que a adição de fertilizantes fosfatados provoca acúmulo de Pi nas frações extraídas por NaHCO_3 e NaOH . As formas de P-Ca, que correspondem a fração Pi-HCl podem ter sido influenciadas pela fertilização (Abolfazli et al., 2012); as concentrações de P da fração residual podem sofrer decréscimo, ou acúmulo no caso de CS-5, dependendo da relação estabelecida com os demais *pools* de um sistema produtivo (Alamgir et al., 2012). Isso explica a maior acumulação em P-residual advindo da adubação. Esse compartimento pode contribuir para a nutrição vegetal em situações de extrema escassez de P no solo (Guardini et al., 2012).

Nas agroflorestas estudadas, houve a diminuição da mineralização da fração orgânica pelo incremento de Pi via adubação, o que acaba por promover a manutenção do estoque orgânico bem como o seu incremento nas áreas (Carneiro et al., 2011), ou até mesmo o Pi- NaHCO_3 pode estar se estabilizando em Po, através dos processos de absorção de Pi pelas plantas, o que após absorvido ocorre deposição de serapilheira passando pela imobilização microbiana (Schrijver et al., 2012), independentemente do histórico de manejo das áreas, o que demonstra a dinâmica favorável ao acúmulo de Po.

O incremento dos *pools* orgânicos moderadamente lábeis nas coberturas que se mantiveram por mais tempo sem alteração da sua forma de manejo puderam ser observados através da fração extraível com NaOH , ocasionada pelo dreno a partir do Pi-lábil (Pi-resina + Pi- NaHCO_3) (Hamer et al., 2013). Nessa afirmação se insere a agrofloresta CE-2 por possuir cerca de 35 anos de uso sem transformações abruptas. A mesma relação pode ser observada para as áreas comparativas PA-6 e FM-9, que apesar de não serem adubadas, demonstraram acúmulo nas frações moderadamente lábeis por possuírem maior tempo de estabilidade. Entretanto, para a quantificação dos estoques de fósforo em CE-2 deve-se levar em consideração uma possível contribuição da cobertura de *Erytrina* sp. que ao depositar grandes quantidades de resíduos ricos em nutrientes pode estar atuando de forma benéfica para o acúmulo de P no solo (Haggar et al., 2011). A oferta de frações moderadamente lábeis de Pi parece

também estar sendo influenciada pela forma de manejo adotado nas agroflorestas de CS-1, CA-4 e CF-8, o que demonstra a similaridade de agroflorestas compostas de cacau e seringueira com sistemas de plantios clássicos como a agrofloresta em sistema de cabruca.

O P-ocluído que corresponde a frações extraídas com NaOH adicionado de ultrassom e onde, possivelmente, ocorre uma alta concentração de P associado a agregados de matéria orgânica, assim como todas as áreas apresentaram acumulação superiores de Po em detrimento de Pi. As áreas CA-4, CF-8 e FM-9 apresentaram taxas semelhantes de acumulação de Po-ocluído o que demonstra a forte relação entre a agrofloresta de cacau em sistema de cabruca com a mata nativa no que se refere ao fósforo ligado aos agregados de MO, que ao longo de períodos extensos, como décadas em nossos agrossistemas, possam contribuir para o *pool* disponível de fósforo (Zheng et al., 2002; Richter et al., 2006) através do manejo adequado desse agrossistema (Gama-Rodrigues et al., 2007).

O pasto (PA-6), apesar de não ser adubado durante os 30 anos de uso, ficou entre as áreas de maior concentração de fósforo orgânico ocluído, isto se deve ao fato de gramíneas contribuírem na formação e estabilização de agregados orgânicos no solo, através de suas densas raízes Wohlenberg et al. (2004), contudo há uma segunda hipótese de que o aumento inicial de Po no solo de PA-6 após a conversão da mata nativa em pasto (Garcia-Montiel et al., 2000) tenha se mantido e estabilizado mesmo após a década de uso não pode ser descartada.

A relação C:Po nos fornece o *status* nutricional de P do solo (Dieter et al., 2010), onde a queda nessa relação caracteriza a acumulação de Po no solo, ao passo que o aumento da relação C:Po caracteriza a mineralização de Po para suprir o *pool* de fósforo disponível. Segundo (McGill e Cole, 1981), essa relação independe das proporções de carbono no solo, pois a mineralização do Po pode ocorrer de forma independente pela ação de microrganismos e da rizosfera dos vegetais. Os valores estimados que definem essa relação C:Po se baseiam no trabalho de Smeck (1985), onde está descrito que solos intemperizados tendem a possuir um incremento nessa relação C:Po em relação a solos menos intemperizados. Assim relações superiores a 200 caracterizam solos com escassez de P ao passo que solos com valores inferiores a 100 possuem alta

capacidade de suprir fósforo ao sistema. Na Tabela 2, podemos visualizar a relação C:Po para todas as nove áreas, assim pode-se observar que todas as coberturas possuem valores inferiores a 200, corroborando com a afirmação que essas áreas possuem uma capacidade de ceder fósforo ao sistema através da mineralização do Po, entretanto a agrofloresta CE-2 foi a única que apresentou valor inferior a 100 em sua relação C:Po, possuindo assim uma elevada capacidade de mineralizar Po e assim ceder P ao *pool* disponível, o que confirma os resultados obtidos através do fracionamento de fósforo já descritos.

5.2. Análise de componentes principais e correlações de Pearson

Os resultados do PCA para a análise das nove áreas sustenta que houve diferenças nas transformações de P de acordo com o manejo e uso da terra nos agrossistemas de cacau (Figura 5). De acordo com a análise as agroflorestas CA-4 e CF-8 são similares entre si, com resultado esperado pelo fato de ambas possuírem formas de manejo semelhantes, diferindo apenas no arranjo espacial do plantio, sendo CF-8 uma área com espaçamento adensado de cobertura de mata nativa. Entretanto, essas áreas foram altamente similares às áreas comparativas FM-9 e PA-6, demonstrando que os agroflorestas de cacau em sistema de cabruca (CA-4 e CF-8), mesmo que adubados, podem manter a dinâmica de P no solo semelhante ao ecossistema da floresta reforçando a afirmativa de Melo et al. (2001) que agroflorestas equiparam-se a ecossistemas naturais em sua estrutura funcional. A similaridade de PA-6 no PCA para com as áreas já descritas mostra-nos que, mesmo após 30 anos de uso sem fertilização, as condições presentes no solo mantêm características similares à floresta nativa, sobretudo devido a grande concentração de fósforo retido no interior de agregados (Garcia-Montiel et al., 2000).

A análise das agroflorestas no PCA ainda nos fornece a alta similaridade entre as faixas duplas de agroflorestas de cacau em CSFD-3 e CFSD-7, bem como entre as suas faixas duplas de seringueira. Esse resultado encontrado mostra que apesar do histórico de uso das áreas antes da implantação da agrofloresta ser diferente (CSFD-3 anteriormente pasto e CFSD-7 anteriormente uma capoeira) as transformações de P no solo tornaram-se semelhantes devido à nova cobertura implantada com relação aos *pools* de P encontrados, até mesmo a

despeito de diferentes quantidades de adubos fosfatados utilizados nas coberturas (Tabela 1). A agrofloresta CS-5 foi a de maior dissimilaridade devido a altas concentrações de P em suas frações inorgânicas.

Em ambas as análises, na correlação de Pearson e no PCA, as frações que se correlacionaram com a fração Pi-resina foram as frações do *pool* inorgânico de P e a fração Po-NaHCO₃. Em áreas que passam por fertilização, como as áreas de estudo, ocorre o acúmulo de Pi no solo que acaba por tamponar a solução do solo, promovendo o acúmulo dos pools orgânicos de P (Negassa e Leinweber, 2009). Entretanto, a contribuição da fração lábil Po-NaHCO₃ pode estar ocorrendo devido a uma mineralização através de microrganismos (Chen et al., 2008; Zaia et al., 2008a) ou até mesmo pela ação de enzimas secretadas pela rizosfera da cobertura vegetal (McGill e Cole, 1981; Chen et al.; 2002)

5.3. Regressão múltipla e análise de trilha

A decomposição dos coeficientes de correlação entre Pi-resina e as frações de P selecionados por análise de regressão *backward* (Tabela 7) baseados em efeitos diretos e indiretos mostraram que todas as frações apresentaram efeitos significativos diretos positivos (Pi-NaHCO₃, Pi-NaOH, Pi-HCl e P-residual), corroborando a afirmação que parte do *pool* inorgânico de P esteja contribuindo efetivamente para a adição de formas de P para *pool* disponível, enquanto efeitos negativos diretos (Po-NaHCO₃, Pi-NaOH+Ultrasom e Po-NaOH+Ultrasom) sugerem que o *pool* orgânico juntamente com a fração inorgânica de P-ocluso estejam agindo como dreno do P-solução. Apesar das frações apresentarem efeitos diretos significativos, a fração Pi-NaHCO₃ foi a com maior contribuição para com o P-solução ($\beta=1,22$), enquanto a fração Pi-NaOH+Ultrasom foi a que se apresentou como a maior responsável pelo dreno do P prontamente disponível às plantas ($\beta= -0,51$).

A análise trilha demonstrou quais as frações estão altamente correlacionadas entre si (Tabela 8) através de uma análise de regressão. Entretanto, pode-se observar na Tabela 7 que a fração Pi-NaOH não é significativa na regressão múltipla, porém na análise de trilha torna-se significativo, a Tabela 8 mostra que a fração Po-NaOH+Ultrasom não apresenta

nenhum tipo de efeito significativo na análise de trilha, e valor significativo na análise de regressão múltipla. Assim, a análise de trilha o Pi-NaHCO₃ apresentou efeitos diretos positivos e o Po-NaOH efeitos diretos negativos. As frações Po-NaHCO₃, Pi-NaOH, Pi-NaOH+Ultrassom, Pi-HCl e P-residual apresentaram efeitos indiretos positivos via Pi-NaHCO₃ para com Pi-resina.

Cada análise empregada em explicar as interações entre as frações de P do solo analisa os dados estatisticamente de acordo com parâmetros estabelecidos, e analisá-las separadamente para obter uma interpretação de resultados torna-se passível de erros. Entretanto, ao analisar separadamente a regressão múltipla notou-se que a fração Po-NaOH não apresentava interação com o Pi-resina, ao passo que para a análise de trilha observou-se que a fração Po-NaOH+Ultrassom não apresenta efeitos sobre a fração Pi-resina, e ao somar as duas informações obtem-se que a análise de PCA aponta essas mesmas frações como dissimilares do restante do conjunto estando mais correlacionadas com o segundo componente do diagrama (Figura 6).

5.4. Modelagem de equações estruturais (SEM)

Ao comparar os resultados dos modelos hipotéticos 1 e 3 (Tabela 9), que foram construídos a partir da modelagem de equações estruturais, é possível concluir que as frações inorgânicas de P como as frações lábeis (Pi-NaHCO₃), moderadamente lábeis (Pi-NaOH) e frações que possuem P ligado ao Ca (P-HCl) possuem uma relação no suporte direto de fósforo ao *pool* disponível (Figuras 7 e 9), resultado este, esperado em agroflorestas dispostas em solos tropicais e que passaram por fertilização (Szott e Melendez, 2001). Durante a fertilização anual era esperado que ocorresse aumento nos teores de Pi pela saturação dos sítios adsorção do solo das frações lábeis e moderadamente lábeis de Pi (Sugihara et al., 2012), bem como nas demais frações inorgânicas, exceto a fração P-residual (Beck e Sanches, 1994). Após a fertilização anual, no período em que o solo não é adubado, as frações inorgânicas de P que estavam saturadas passaram a ceder esse P lentamente ao *pool* disponível do solo (Linguist et al, 1997).

A fração de P-ocluso (Pi-NaOH+Ultrassom) atuou como dreno do *pool* disponível em ambos os modelos apresentados retendo o Pi internamente em

agregados altamente reativos, o que é uma característica de solos tropicais intemperizados (Novais et al., 2007).

A capacidade de Pi-NaOH e Pi-HCl de ceder P para a fração Po-NaHCO₃ através da imobilização microbiana quando se inclui na análise as áreas PA-6 e FM-9 (Figura 7) também pode ser verificado. O fósforo orgânico assume maior proporção em solos não manejados como florestas e em áreas sem registro de adubação (Novais e Smyth, 1999). A fração Po-NaHCO₃ ainda atuou cedendo fósforo para Pi-NaHCO₃ através da mineralização das formas orgânicas no modelo hipotético 1 (Figura 7), o que não ocorre no modelo hipotético 3 (Figura 9) que foi representado somente por agroflorestas de cacau. A fração P-residual demonstra ainda contribuição direta tanto para Pi-NaOH+Ultrassom quanto para Pi-NaHCO₃, além de contribuir para o Po-NaHCO₃ no modelo hipotético 1. Segundo Chen et al. (2000) o P-residual pode ser fonte de fósforo para frações mais lábeis.

6. CONCLUSÕES

A adubação via fertilizantes fosfatados das agroflorestas analisadas proporcionou acumulação de fósforo orgânico (Po) indicando que a adubação fosfatada em agroflorestas de cacau e seringueira pode ser feita com um tempo maior entre as campanhas de fertilização.

A alta similaridade nas formas de acumulação de fósforo entre as faixas duplas de cacau, bem como entre as de seringueira, pode ser observada, apesar de CSFD-3 anteriormente pasto e CFSD-7 anteriormente uma capoeira. Os resultados demonstraram que a cobertura de seringueira pode contribuir positivamente na acumulação de fósforo para a agrofloresta com cacau em faixas duplas.

As agroflorestas de cacau em sistema de cabruca aberta, cabruca fechada, fragmento de mata nativa e pasto são similares entre si quanto às transformações de P no solo.

A agrofloresta de cacau com *Erythrina* sp. alcançou os maiores estoques de P-total (semelhantemente a agrofloresta CS-5) bem como maior estoque de Po-total proveniente da acumulação do fósforo orgânico moderadamente lábil.

Foram propostos e analisados modelos conceituais do ciclo de fósforo em solos tropicais fertilizados para agroflorestas de cacau, onde foi possível concluir que o *pool* de Pi constitui a principal fonte para o *pool* disponível, assim como a fração orgânica lábil de P possui uma contribuição para o modelo através da mineralização via fração inorgânica lábil e assim para o *pool* disponível. A

modelagem de equações estruturais tornou-se uma ferramenta que possibilita o entendimento das transformações do fósforo no solo das agroflorestas estudadas, sobretudo na forma do manejo a ser implantado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abolfazli, F., Forghani, A., Norouzi, M. (2012) Effects of phosphorus and organic fertilizers on phosphorus fractions in submerged soil, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12 (2):349-362.
- Agbenin, J.O., Tiessen, H. (1994) Phosphorus transformations in a toposequence of lithosols and cambisols from semiarid northeastern Brazil, *Geoderma*, 62:345-362.
- Alamgirm, M., McNeill, A., Tang, C., Marschner, P. (2012) Changes in soil P pools during legume residue decomposition, *Soil Biology & Biochemistry*, 49:70-77.
- Allison, V.J., Yermakov, Z., Miller, R.M., Jastrow, J.D., Matamala, R. (2007) Using landscape and depth gradients to decouple the impact of correlated environmental variables on soil microbial community composition, *Soil Biology & Biochemistry*, 39:505–516.
- Barber, S.A. (1995) *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach*. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, p.414.
- Beck, M.A., Sanchez, P.A. (1994) Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a typic paleudult, *Soil Science Society of America Journal*, 58(5):1424-1431.

- Bielecki, R.L., Ferguson, I.B. (1983) Physiology and metabolism of phosphate and its compounds. *In*: Lauchi, A., Bielecki, R.L., (eds.) *Enciclopedia of plant physiology: Inorganic plant nutrition*. Berlin, Springer-Verlag, p.422-429.
- Bistaffa, B.C. (2010) *Incorporação de indicadores categóricos ordinais em modelos de equações estruturais*. Dissertação (Mestrado), USP – São Paulo. p.142.
- Bowman, R.A., Cole, C.V. (1978) An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils, *Soil Sci.*, 125:49-54
- Byrne, B.M. (2009) *Structural Equation Modeling with AMOS: basic concepts, applications, and programming*, Multivariate Applications Series, 2^a edition, p.338.
- Carneiro, L.F., Resende, A.V., Neto, A.E.F., Santos, J.Z.L., Curi, N., Reis, T.H.P., Valle, L.A.R. (2011) Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo com diferentes históricos de uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 35 (2):483-491.
- 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 and Soil*. 200:151-163.
- Chen, C.R., Condon, L.M., Davis, M.R., Sherlock, R.R. (2002) Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and radiata pine (*Pinus radiata* D. Don.), *Soil Biol. Biochem.*, 34:487-499.
- Chen, C.R., Condon, L.M., Xu, Z.H. (2008) Impacts of grassland afforestation with coniferous trees on soil phosphorus dynamics and associated microbial processes: A review, *Forest Ecology and Management*, 255(3–4):396-409.
- Condon, L.M., Newman, S. (2011) Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils, *Soils and Sediments*. 11:830-840.
- Comerford, N.B., Cropper, W., Grierson, P.F., Araujo, Q., Jose, S. (2006) Modeling P bioavailability and uptake in agroforestry systems. *In*: Gama

- Rodrigues, A.C., Barros, N.F., Gama-Rodrigues, E.F., Freitas, M.S.M., Viana, A.P., Jasmin, J.M., Marciano, C.R, Carneiro, J.G.A. (eds.) (2006) *Sistemas agroflorestais: Bases científicas para o desenvolvimento sustentável*. Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense, p.303-315.
- 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*, 31:667-672.
- Daher, R.F., Pereira, A.V., Pereira, M.G., LEDO, F.J.S., Junior, A.T.A., Rocabado, J.M.A., Ferreira, C.F.; TARDIN, F.D. (2004) Análise de trilha de caracteres forrageiros do capim-elefante. *Ciência Rural*, 34(5):1531-1535.
- 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.
- Doblas-Miranda, E., Sanchez-Piñhero, F., Gonzales-Megias, A. (2009) Different structuring factors but connected dynamics shape litter and belowground soil macrofaunal food webs, *Soil Biology & Biochemistry*, 41:2543–2550.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (1999) *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. Brasília: Embrapa solos, p.379.
- Farias, D.R., Oliveira, F.H.T., Santos, D., Arruda, J.A., Hoffmann, R. B., Novais, R.F. (2009) Fósforo em solos representativos do estado da Paraíba. I – Isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:623-632.

- Fassbender, H.W. (1993) *Modelos edafológicos de sistemas agroflorestais*, Turrialba: CATIE, p.491.
- Frossard, E., Condon, L.M., Oberson, A., Sinaj, S., Fardeau, J.C. (2000) Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *J. Environ. Qual.* 29:12–53.
- 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*, p.1-17.
- Garcia-Montiel, D.C., Neill, C., Melillo, J., Thomas, S., Steudler, P.A., Cerri, C.C. (2000) Soil phosphorus transformations following forest clearing for pasture in the Brazilian Amazon, *Soil Science Society of America Journal*, 64 (5):1792-1804.
- Gatiboni, L.C., Brunetto, G., Rheinheimer, D.S., Kaminski, 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.
- George, T.S., Gregory, P.J., Robinson, J.R., Buresh, R.J., Jama, B. (2002) Utilization of soil organic P by agroforestry and crop species in the field, Western Kenya, *Plant Soil*, 246:53-63.
- Golfari, L., Caser, R.L., Moura, V.P.G. (1978) *Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil (2a. aproximação)*. Belo Horizonte, Centro de Pesquisa Florestal da Região do Cerrado. PNUD/FAO/IBDF/BRA-45, 11:66.
- Grace, J.B. (2006) *Structural Equation Modeling and Natural Systems*, CAMBRIDGE, p.338.

- Grace ,J.B., Bollen, K.A. (2008) Representing general theoretical concepts in structural equation models: the role of composite variables. *Environ Ecol Stat* 15:191-213.
- Grierson, P.F., Smithson, P., Nziguheba, G., Radersma, S., Comerford, N.B. (2004) Phosphorus dynamics and mobilization by plants. *In: Noordwisk, M., Cadisch, G., Ong, C.K. (eds.) Below-ground interactions in tropical agroecosystems: Concepts and models with multiple plant components*, CABI International, Wallingford, p.127-142.
- Guardini, R., Comin, J.J., Schmitt, D.E., Tiecher, T., Bender, M.A., Santos, D.R., 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.
- Haggar, J., Barrios, M., Bolaños, M., Merlo, M., Moraga, P., Munguia, R., Ponce, A., Romero, S., Soto, G., Staver, C., de Virginio, E.M.F. (2011) Coffee agroecosystem performance under full sun, shade,conventional and organic management regimes in Central America, *Agroforestry Systems*, 82(3): 285-301.
- Hair, Jr.J.F., Black, W.C., Babin, B.J., Aanderson, R.E., Tatham, R.L. (2009) *Análise Multivariada de Dados*, Bookman, 6ª ed., Porto Alegre – RS, Brasil, p.688.
- Hamer, U., Potthast, K., Wilcke, W., Wullaert, H., Valarezo, C., Sandmann, D., Maraun M., Scheu, S., Homeier, J. (2013) Future regulating (supporting) services: Matter turnover and nutrient additions. *In: Bendix, J., Beck, E., Bräuning, A., Makeschin, F., Mosandl, R., Scheu, S.,Wilcke, W. (eds.) Ecosystem Services, Biodiversity and Environmental Change in a Tropical Mountain Ecosystem of South Ecuador*. Ecological Studies (221), Springer, Berlin, p.286

- 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.
- Hershberger, S.L., Marcoulides, G.A., Parramore, M.M. (2003) Structural equation modeling: An introduction. *In: B.H. Pugesek, A., Tomer A.V., (eds.) Structural equation modeling: Applications in ecological and evolutionary biology*, Cambridge: Cambridge University Press, p.3-41.
- Hines, W.W., Montgomery, D.C., Goldsman, D.M., Borror, C.M. (2012) *Probabilidade e Estatística na Engenharia*. 4ª edição, LTC Editora, Rio de Janeiro, p.588.
- Hooper, D., Coughlan, J., Mullen, M.R. (2008) Structural equation modelling: guidelines for determining model fit. *Electron J Bus Res Methods*, 6:53–60.
- Kanmegne, J., Dugma, B., Henrot, J., Isirimah, N.O. (1999) Soil Fertility Enhancement by Planted Tree-fallow Species in the Humid Lowlands of Cameroon. *Agroforestry Systems*, 46:239-249.
- Lehmann, J., Günther, D., Socorro Da Mota, M., Pereira De Almeida, M., Zech, W., Kaiser, K. (2001) Inorganic and organic soil phosphorus and sulfur pools in an amazonian multistrata agroforestry system, *Agroforestry Systems*, 53(2):113-124.
- Linquist, B.A., Singleton, P.W., Cassman, K.G. (1997) Inorganic and organic phosphorus dynamics during a build-up and decline of available phosphorus in an ultisol, *Soil Science*, 162(4):254-264.
- McGill, W.B., Cole, C.V. (1981) Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter, *Geoderma*, 26(4):267-286.
- Martinazzo, R., Rheinheimer, D.S., Gatiboni, L.C., Brunetto, G., Kaminskil, J. (2007) Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31:563-570.

- Melo, A.C.G., Neto, P.J.S., Martins, A.C.S. (2001) Enfoques sobre cacauzeiros em sistemas agroflorestais. *In: Silva Neto, P.J., et al. Sistema de produção de cacau para a Amazônia brasileira*. Belém, CEPLAC, p.125.
- Murphy, J., Riley, J.P. (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters, *Analytical Chemistry Acta*, Amsterdam, 27:31-36.
- Müller, M.W., Almeida, C.M.V.C., Sena-Gomes, A.R. (2003) Sistemas agroflorestais com cacau: Uma alternativa para Explotaciones Sostenibles em el Trópico. *Seminário Internacional de Agroforesteria com Ênfasis em Cacao. Anales*, CORPOICA.
- Müller, M.W., Gama-Rodrigues, A.C. (2012) Sistemas agroflorestais com cacauzeiro. *In: Valle, R.R. Ciência, Tecnologia e Manejo do Cacauzeiro*. 2.ed, CEPLAC, Brasília, p.407-435.
- 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.
- Oberson, A., Pypers, P., Bünemann, E.K., Frossard, E. (2011) Management impacts on biological phosphorus cycling in cropped soils. *In: Bünemann, E.K., Oberson, A., Frossard, E. Phosphorus in Action*, Vol. 100, Soil Biology, Springer Berlin Heidelberg, p.431-458.
- Oehl, F., Frossard, E., Fliessbach, A., Dubois, D., Oberson, A. (2004) Basal organic phosphorus mineralization in soils under different farming systems, *Soil Biology and Biochemistry*, 36:667-675.

- Pettersson K.B. Boström, Jacobsen, O. (1988). Phosphorus in sediments – speciation and analysis. *Hydrobiologia* 170:91–101.
- Prober, S.M., Wiehl, G. (2012) Relationships among soil fertility, native plant diversity and exotic plant abundance inform restoration of forb-rich eucalypt woodlands, *Diversity and Distributions*, 18(8):795–807.
- Radersma, S. (2002) *Tree effects on crop growth on a phosphorus-fixing ferralsols*, Tese (Pós-doutorado), Wageningen University Research Center - Wageningen. NL. Richardson, A.E, p.183.
- Ramirez, C.O., Bornemisza, E. (1990) Efecto de residuos orgánicos y abonamiento mineral sobre las propiedades químicas de un typic humitropept en Turrialba, Costa Rica, *Agronomía Costarricense*. 14(2):237-240.
- Rheinheimer, D.S., Anghinoni, I., Conte, E. (2000) Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24:589-597.
- Rheinheimer, D.S., Anghinoni, I., Flores, A.F. (2002) Organic and inorganic phosphorus as characterized by phosphorus-31 by nuclear magnetic resonance in subtropical soils under management systems, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(11-12):1853-1871.
- Rheinheimer, D.S., Cassol, P.C, Kaminski, J., Anghinoni, I. (2008) Fósforo orgânico do solo. In: Santos, G.A.; Silva, L.S., Canellas, L.P., Camargo, F.O. (ed.) *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2.ed., Rev. Atual, Porto Alegre, p.101-112.
- Richardson, A.E., Simpson, R.J. (2011) Soil microorganisms mediating phosphorus availability, *Plant Physiology*, 156:989-996.
- Richter, D.D., Allen, H.L., Li, J.W., Markewitz, 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.

- Santana, S.O., Santos, D.R., Gomes, I.A., Jesus, R.M., Araujo, Q.R., Mendonça, J.R., Calderano, S.B., Filho, A.F.F. (2002) *Solos da região Sudeste da Bahia: atualização da legenda de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos*. Ilhéus: CEPLAC; Rio de Janeiro : Embrapa Solos, p.93.
- Schrijver, A., Vesterdal, L., Hansen, K.I., Frenne, P., Augusto, L., Achat, D.L., Staelens, J., Baeten, L., Keersmaeker, L., Neve, S., Verheyen, K. (2012) Four decades of post-agricultural forest development have caused major redistributions of soil phosphorus fractions, *Oecologia*, 169(1):221-234.
- Silva, F.C., RAIJ, B. (1999) Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores, *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:267-288.
- Slazak, A., Freese, D., Matos, E.S., Huettl, R.F. (2010) Soil organic phosphorus fraction in pine-oak forest stands in Northeastern Germany, *Geoderma*, 158:156-162.
- Smeck, N. E. (1985) Phosphorus dynamics in soils and landscapes, *Geoderma*, 36(3-4):185-199.
- Souza, R.F., Faquin, V., Andrade, A.T., Torres, P.R.F. (2007) Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31:1535-1544.
- Sugiharaa, S., Shinya, F., Tomohiro, N., Method, K., Takashi K. (2012) Dynamics of fractionated P and P budget in soil under different land management in two Tanzanian croplands with contrasting soil textures, *Agriculture, Ecosystems e Environment*, 162:101-107.
- Stvenson, F.J., Cole, M.A. (1999) *Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, p.427.
- Stewart, J.W.B., Tiessen, H. (1987) Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry*, 4:41-60.

- Szott, L.T., Melendez, G. (2001) Phosphorus availability under annual cropping, alley cropping, and multistrata agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 53:125–132.
- Syers, J.K., Craswell, E.T. (1995) Role of soil organic matter in sustainable agricultural systems. *In: Lefroy, R.D.B., Blair, G.J., Craswell, E.T. (ed.) Soil organic matter management for sustainable agriculture*. Canberra: ACIAR, p.7-14.
- Tiessen, H., Ballester, M.V., Salcedo, I. (2011) Phosphorus and global change. *In: Bünemann, E.K., Oberson, A., Frossard, E. Phosphorus in Action*, Vol. 100, Soil Biology, Springer Berlin Heidelberg, p.459-471.
- Tiessen, H., Moir, J. (2007) Characterization of available P by sequential extraction. *In: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (eds.) Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science, p.293-306.
- Turner, B.L., Frossard, E., Baldwin, D.S. (2003) *Organic phosphorus in the environment*. Ascona, Switzerland: Organic Phosphorus, p.391.
- 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.
- Wohlenberg, E.V., Reichert, J.M., Reinert, D.J., Blume, E. (2004) Dinâmica da agregação de um solofranco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação em rotação e em sucessão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28:891-900.
- Yang, W., Hao, F., Cheng, H., Lin, C., Ouyang, W. (2013) Phosphorus Fractions and Availability in an Albic Bleached Meadow Soil, *Agronomy Journal*. 105:1451-1457.

- Young, A. (1989) *Agroforestry for soil conservation: Tropical regions*. Soils. Conservation use of trees. CAB International, International Council for Research in Agroforestry, p.318.
- Zaia, F.C., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Machado, R.C.R. (2008a) Fósforo orgânico em solos sob agroecossistemas de cacau. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:1987-1995.
- Zaia, F.C., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F. (2008b) 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.
- Zhang, C.B., Wang, J., Qian, B.Y., Li, W.H. (2009) Effects of the invader *Solidago Canadensis* on soil properties. *Applied Soil Ecology*, 43:163-169.
- Zheng, Z., Simard, R.R., Lafond, J., Parent, L.E. (2002) Pathways of soil phosphorus transformations after 8 years of cultivation under contrasting cropping practices, *Soil Science Society of America Journal*, 66(3):999-1007.