

**ESTEQUIOMETRIA DE CARBONO, NITROGÊNIO E FÓSFORO NO PERFIL DO
SOLO DE DIFERENTES CLASSES E SISTEMAS DE USO NO SUL DA BAHIA**

LAILSON DA SILVA FREITAS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
ABRIL – 2022**

ESTEQUIOMETRIA DE CARBONO, NITROGÊNIO E FÓSFORO NO PERFIL DO
SOLO DE DIFERENTES CLASSES E SISTEMAS DE USO NO SUL DA BAHIA

LAILSON DA SILVA FREITAS

“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”.

Orientador: Prof.^o Antônio Carlos Gama-Rodrigues

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
ABRIL – 2022

ESTEQUIOMETRIA DE CARBONO, NITROGÊNIO E FÓSFORO NO PERFIL DO SOLO DE DIFERENTES CLASSES E SISTEMAS DE USO NO SUL DA BAHIA

LAILSON DA SILVA FREITAS

“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”.

Aprovada em 26 de maio de 2022

Comissão Examinadora

Dr. Alexandre Gomes Fontes (D. Sc. Produção Vegetal) UENF

Dr. Gláucio de Mello Cunha (D. Sc. Produção Vegetal) UENF

Dr. Seldon Aleixo (D. Sc. Produção Vegetal) UENF

Dr. Antônio Carlos da Gama-Rodrigues (D. Sc. Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) UFV
(Orientador)

À minha mãe (Maria do Rosário), por ser minha inspiração, me apoiar na realização dos meus sonhos e me conduzir até aqui.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre ter guiado os meus caminhos e me dado força, coragem e sabedoria para alcançar todos os meus objetivos e realizar todos os meus sonhos;

À minha mãe, Maria do Rosário Silva da Silveira, por ter me proporcionado, além de amor, carinho, afeto e dedicação, o acesso à educação, apesar de todas as dificuldades encontradas, possibilitando a conclusão de mais essa fase da minha vida acadêmica;

A toda a minha família, aos meus irmãos, Fábio e Evandro, aos meus tios, Edilson, Arenilson, Francisco e Maria, aos meus sobrinhos, Elber, Éder, Sophia, Ítallo e Igor, e aos meus primos, pelo apoio e incentivo para seguir na formação acadêmica e profissional. De modo especial, agradeço à minha irmã, Laiany Freitas Silva, por ter me acolhido nos momentos mais difíceis dessa trajetória e por não ter me deixado desistir nos momentos de aflição, enfermidades e transtornos causados pelos tempos difíceis em que vivemos;

Aos meus amigos, em especial ao meu amigo Alex Paulo do Carmo, pela parceria, por ter dividido o tempo, o teto e os conhecimentos comigo, pelos conselhos, orientações e incentivo diante dos momentos difíceis pelos quais passei nesse período, possibilitando a finalização dessa etapa.

De modo especial, agradeço ao professor Félix Lélis da Silva e ao amigo Júlio Ciqueira de Almeida pela amizade, e contribuições no processo de construção deste trabalho e pela parceria acadêmica construída ao longo do tempo;

Agradeço à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e ao Laboratório de Solos, por oportunizar a realização do curso e contribuir para minha formação profissional;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo financiamento e à UENF pela execução da bolsa de Mestrado pelo programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal;

Ao Professor Dr. Antônio Carlos da Gama-Rodrigues pela orientação e à equipe do Laboratório de Solos pela contribuição no desenvolvimento da pesquisa;

À Laís Rinaldi pela colaboração no desenvolvimento da pesquisa e contribuição na elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vii
INTRODUÇÃO	1
REVISÃO DE LITERATURA	4
Sistemas Agroflorestais de cacau	4
Carbono no solo	7
Nitrogênio no solo	9
Fósforo no solo	11
Relação estequiométrica C:N:P no solo	13
MATERIAIS E MÉTODOS	17
Caracterização da área de estudo	17
Análise física e química	19
Análises dos dados	22
RESULTADOS	23
Concentração de C, N e P no solo	23
Análise dos componentes principais (PCA)	26
Comportamento da relação C:N, C:P_o e N:P_o no perfil do solo	27
DISCUSSÃO	36
Comportamento da relação C:N do solo	36
Comportamento da relação C:P_o e N:P_o do solo	38
Comportamento da relação C:N:P_o no solo	43
Estequiometria entre classes de solos e sistemas de uso	45
RESUMO E CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
APÊNDICE	78

RESUMO

FREITAS, Lailson da Silva, M.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Março, 2022. Estequiometria de carbono, nitrogênio e fósforo no perfil do solo de diferentes classes e sistemas de uso no Sul da Bahia. Orientador: Prof. Antônio Carlos da Gama-Rodrigues.

A estequiometria auxilia na busca por informações a respeito da dinâmica, ciclagem e disponibilidade dos nutrientes no solo. Estudos das razões C:N:P no perfil do solo tem ganhado muita importância nos últimos anos, uma vez que são indicadores da estabilização e mineralização da matéria orgânica que influencia a fertilidade e o armazenamento do carbono no solo. Nesse sentido, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a estequiometria de C:N:P₀ em seis camadas de solo (0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm) de 10 sistemas de uso distribuídos em três classes de solos: Argissolo Amarelo (Mata, Pastagem, Seringueira), Argissolo Acinzentado (Mata, Pastagem, Seringueira, Seringueira-Açaí, Seringueira-Cacau) e Nitossolo Háplico (Seringueira-Cacau e Eritrina-Cacau). As áreas de estudo ficam localizadas na Estação Experimental Djalma Bahia nos municípios de Una e Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC) em Ilhéus no Sul da Bahia, Brasil. A coleta de amostras de solo foi realizada em três parcelas de 30 m² em trincheiras de 1x1x1,5. Na sequência, o C_{OT} e N_T foi determinado por combustão seca e o P₀ foi obtido por meio da diferença entre P_I e P_T que foram extraídos com NaOH+Na₂EDTA e determinados por colorimetria e espectrofotometria a 880 nm, respectivamente. Posteriormente, foram calculadas as razões molares entre os elementos. Para atendimento aos preceitos de normalidade e homogeneidade, os dados foram submetidos à transformação por Box-Cox e, em seguida, a análise de variância (ANOVA) e teste Tukey de comparação de médias. A regressão linear foi usada para analisar a distribuição das razões elementares no perfil do solo e a Análise dos Componentes Principais (PCA) para verificar a similaridade entre os tratamentos. Os resultados mostraram pouca variação da relação C:N no perfil do solo em todos os sistemas e classes de solos, evidenciando pouca influência do tipo de uso do solo sobre esta variável. Houve grande variação nas razões C:P₀ e N:P₀ no perfil das três classes de solo em todos os sistemas, sendo os maiores valores observados nas camadas mais profundas, havendo limitação de P em todos os sistemas nos Argissolos Amarelo e Acinzentado nas camadas abaixo de 60 cm. Os SAFs do Hitossolo Háplico apresentaram menores

valores para as razões C:P₀ e N:P₀ mostrando que há uma maior concentração de P₀ nos solos desses sistemas.

Palavras-chave: Razões molares; manejo do solo; ciclagem de nutrientes.

ABSTRACT

FREITAS, Lailson da Silva, M.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. March, 2022. Stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in the soil profile of different classes and use systems in southern Bahia. Advisor: Prof. Antonio Carlos da Gama-Rodrigues.

Stoichiometry helps in the search for information about the dynamics, cycling and availability of nutrients in the soil. Studies of the C:N:P ratios indicators in the soil profile have gained a lot of importance in recent years, since it is the storage of carbon in the soil, influencing fertility and the storage of carbon in the soil. In this sense, the present research aimed to evaluate the stoichiometry of C:N:PO in six soil layers (0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm) of 10 systems of use distributed in three soil classes (Yellow Argisol, Pasture, Rubber Tree), Gray Argisol (Forest, Pasture, Rubber Tree, Rubber Tree-Açaí, Rubber Tree-Cocoa) (Rubber Tree-Cocoa and Erythrin-Cocoa) . The study areas are located at the Djalma Bahia Experimental Station in the municipalities of Una and Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC) in Ilhéus in southern Bahia, Brazil. Soil sampling was carried out in 30 m² plots in the center of each system, where 1x1x15 m trenches were opened and followed by samples collected in each collection layer in three parts. The samples were made into air dried thin pieces (TFSA) to the laboratory for measurement procedures in waves. The CHNS-Elmer Series II 2 2 Analyzer was determined by CHNS-O Analyzer. The PO was obtained by detection with NaOH+Na₂EDTA followed by the determination of PI in the extracts by spectrophotometry at 880°, the PO being the difference between PI and PT. To determine the stoichiometric ratios, the contents of the elements in each soil layer were converted to molar units and then the ratios between the elements were calculated. The data were submitted to a test of normality and homogeneity of the data and then to analysis of variance (ANOVA) and later to the test of comparison of means, regression for quantitative data and Principal Component Analysis (PCA) to verify the similarity between treatments. The results showed little variation of the C:N ratio in the soil profile in all systems and soil classes, showing little influence of the type of land use on this variable. There was great variation in the C:PO and N:PO ratios in the soil profile in the systems and soil classes, with P limitation in all systems in the Yellow Argisol and rubber monoculture (below 20 cm), Rubber-Açaí (below 40 cm) and

Rubber-Cocoa (below 60 cm) in the Gray Argisol and Rubber-Cocoa (below 80 cm) and Erythrin-Cocoa (below 60 cm) in the Haplic Nitosol.

Keywords: Molar ratios, soil management, nutrient cycling

INTRODUÇÃO

O uso frequente e desordenado do solo para fins agrícolas tem causado fortes impactos ambientais, como a perda de florestas, a degradação do solo, perda da biodiversidade e a emissão de gases de efeito estufa (GEE), levando à perda de carbono do solo (Stavi e Lal, 2013). O carbono orgânico em solos tropicais influencia as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, contribuindo para sua estruturação através da formação de agregado e para ciclagem de nutrientes como o nitrogênio (N) e o fósforo (P), através da ação microbiana.

Uma das formas de mitigação desses impactos é através do sequestro de CO₂ da atmosfera e o seu armazenamento em reservatório de longa duração, como a biomassa vegetal e o solo (Kirby e Potvin, 2007; Nair et al., 2009). Nesse sentido, os Sistemas Agroflorestais (SAF) apresentam um grande potencial de sequestro e armazenamento de Carbono (C) por longos períodos (Lorenz e Lal, 2014), podendo, dessa forma, recuperar parte do C perdido na forma de CO₂ pelos sistemas agrícolas (Stavi e Lal, 2013).

Os ecossistemas florestais, em comparação com outros ecossistemas, têm maior potencial de acúmulo de nutrientes, principalmente de C, seja na biomassa vegetal acima do solo ou na biomassa de raízes abaixo do solo, sendo considerados os maiores sumidouros de C da terra (Nair et al., 2009; Gama-Rodrigues et al., 2010; Murthy et al., 2013). Vale ressaltar que cada ecossistema sequestra diferentes quantidades de C no solo, principalmente nas plantas, pois cada espécie tem capacidade diferente de acúmulo desse elemento como fotoassimilados, sendo o potencial de sequestro de C do ecossistema dependente da sua composição florestal (Prasad et al., 2012; Dhyan et al., 2016).

Outros elementos, como o N e o P, são absorvidos e armazenados nas células vegetais, como componentes estruturais ou como fontes de energia nos processos fisiológicos, atuando no metabolismo das plantas que viabilizam o seu desenvolvimento (Santiago, 2015; Deng et al., 2015; Nascimento et al., 2018). A ciclagem ocorre quando esses elementos são exportados na serrapilheira e depositados no solo, contribuindo para o aumento dos teores que, por sua vez,

influenciam o balanço estequiométrico destes elementos no solo (Guareschi et al., 2012).

Os teores de C, N e P do solo são importantes para a dinâmica da ciclagem de nutrientes, devido às suas funções no ciclo biogeoquímico, como fonte de energia ou aporte de nutrientes para biomassa microbiana, que é o agente viabilizador deste processo. Nesse contexto, entende-se que o *turnover* de C, N e P pode ser dependente das relações entre eles e com a biomassa microbiana, pois a incorporação e ciclagem desses elementos dependem da energia (C) e nutrientes (N e P) disponibilizados aos microrganismos, permitindo a ocorrência da mineralização da matéria orgânica do solo (MOS) (Chen et al., 2019).

A estequiometria tem sido usada nos estudos dos ecossistemas para compreender as alterações nas proporções elementares de C, N e P, que são os elementos de maior importância para o desenvolvimento de organismos vivos, sua influência nos processos ecológicos e no desenvolvimento e manutenção dos ecossistemas (Sterner e Elser, 2002; Suo et al., 2016).

A estequiometria de C:N tem sido estudada com mais frequência, devido a sua maior influência no processo de ciclagem de nutrientes, onde regula a atividade microbiana do solo que é responsável pela mineralização da matéria orgânica e a liberação de nutrientes para as plantas (Vargas et al., 2004; Machado et al., 2012).

Apesar de pouco estudadas, as razões estequiométricas C:P e N:P também são importantes na ciclagem de nutrientes, uma vez que o P adicionado aos sistemas também pode atuar na regulação da atividade microbiana, através da incorporação pelos microrganismos, posteriormente, sendo liberado a partir da lise das células microbianas, compondo uma fração de 15 a 80% do P total do solo que é oriundo da matéria orgânica mineralizada (Marin, 2002; Turner et al., 2013; Heuck et al., 2015).

Embora haja algumas hipóteses sobre a relação entre o *turnover* de N e P com o C do solo, essa relação ainda é amplamente desconhecida. Ao contrário da relação C:N, que já foi estudada em detalhes (Ekblad e Nordgren, 2002; Pansu et al., 2004; Pansu et al., 2010; Zhou et al., 2017a) a relação C:N:P e a sua influência na mineralização de N e P no solo ainda necessitam de estudos adicionais (Bergkemper et al., 2016; Heuck e Spohn, 2016).

Dessa forma, propomos um estudo para investigar as variações das relações estequiométricas C:N:P em agroflorestas de cacau, comparando-as com sistemas

de pastagens e mata secundária em três classes de solos tropicais brasileiros. A finalidade é compreender o comportamento das proporções entre os elementos no perfil do solo, na profundidade de 1 metro, nos diferentes sistemas. O objetivo do trabalho foi avaliar a influência de sistemas agroflorestais de cacau sobre a estequiometria de $C_0:N_T:P_0$ em comparação com sistemas de pastagem e floresta secundária sob três classes de solos na região tropical do sul da Bahia.

REVISÃO DE LITERATURA

Sistemas Agroflorestais de cacau

Os Sistemas Agroflorestais (SAF's) são sistemas de uso da terra que, em sua composição, dispõem de culturas agrícolas, árvores e, em alguns casos, criação de animais, diversificando a produção, reduzindo a degradação do solo e, dessa forma, constituindo-se como uma opção viável de uso sustentável da terra (Ribaski et al., 2001; Silva, 2014). Dentre as inúmeras vantagens desses sistemas, destaca-se a utilização eficiente do espaço, a redução de processos erosivos, a sustentabilidade da produção, o estímulo à economia de produção participativa (Medrado, 2000), a mitigação de impactos, a adaptação às mudanças climáticas (Schoeneberger et al., 2012; Mbow et al., 2014) e a prestação de serviços ecossistêmicos (Blaser et al., 2018).

Nos trópicos úmidos, os solos são caracterizados pela baixa fertilidade, acidez elevada e grande potencial de fixação de P mas, apesar disso, florestas naturais conseguem se desenvolver e se manterem devido ao processo de ciclagem de nutrientes (Gama-Rodrigues, 2004). Nesse contexto, os SAF's se apresentam como importante alternativa de uso sustentável do solo, uma vez que são reconhecidos como sendo os sistemas que mais se aproximam ecologicamente das florestas naturais (Nair, 1993; Almeida et al., 1995; Gama-Rodrigues, 2004; Snapp et al., 2010; Pretty, 2018).

As espécies arbóreas na composição dos SAF's trazem inúmeros benefícios para a fertilidade do solo, uma vez que o sistema radicular profundo dessas espécies viabiliza a remobilização de nutrientes das camadas mais profundas, inalcançadas pelas espécies agrícolas e pastagens. Além disso, eleva o teor de N devido à fixação biológica de N₂, liberação de nutrientes na zona radicular das culturas agrícolas pelo processo de deposição e mineralização da matéria orgânica (Ribaski et al., 2001; Pinho, Miller e Alfaia, 2012).

No campo, os sistemas agroflorestais podem ser arranjos de diversas formas. De acordo com Silva (2014), os arranjos de SAF's mais comuns são: *Alley cropping* (fileiras de árvores intercaladas com cultivos agrícolas); cultivo em boxe

(plantio em linhas de árvores nas margens de cultivos agrícolas); cultivo para sombreamento (realizado para sombrear um cultivo principal); talhão ou bosquete (blocos de árvores (talhão) em meio à pastagem com o pastoreio controlado de animais por entre eles); cultivos mistos casualizados (os componentes arbóreos e não arbóreos não apresentam distribuição padronizada) e matas enriquecidas (pratica-se o raleamento e a introdução de espécies de valor econômico).

As culturas do cacau e café são as mais cultivadas em condição de sombreamento por árvores, a fim de reduzir estresses fisiológicos das plantas que podem influenciar a longevidade das culturas (Beer et al., 1998) e, por essa razão, fazem parte de grande parte dos arranjos de SAF's das regiões tropicais. Com relação ao cultivo do cacau, fatores como a necessidade de sombra para o desenvolvimento da planta (Wood e Lass, 2001), a conservação da biodiversidade (Perfecto et al., 2007; Bhagwat et al., 2008) e a diversificação dos sistemas e da produção agrícola, evidenciam a importância do cultivo sombreado da cultura sob florestas (Armengot et al., 2016; Niether et al., 2020).

As árvores cultivadas, em associação com a cultura do cacau, aumentam a diversidade funcional do sistema, contribuem para a ciclagem de nutrientes e para a melhoria das propriedades físicas e químicas do solo (Tschamtker et al., 2011; Koutika et al., 2014; Tchichelle et al., 2017), contribuindo para o aumento da produtividade do cacau, levando a maiores rendimentos a longo prazo em comparação aos cacaueiros cultivados em monocultivos, devido ao envelhecimento precoce da planta por consequência da falta de sombreamento (Obiri et al., 2007; Wessel e Quist-Wessel, 2015; Armengot et al., 2016).

A ciclagem de nutrientes e de C no sistema solo-planta-atmosfera é o principal processo ecossistêmico que ocorre em sistemas agroflorestais, viabilizado pela decomposição da serrapilheira (Bradford et al., 2017; Giweta, 2020). A ocorrência desse processo depende do volume de serrapilheira produzido em cada sistema que, por sua vez, pode variar em função da altitude, latitude, fertilidade do solo, estrutura permanente, clima, composição das espécies de árvores e os diferentes manejos da terra (Apriyanto et al., 2021; Primo et al., 2021; Santhyami et al., 2022).

A produção de serrapilheira é a principal forma de transferência dos nutrientes e do carbono presentes na parte aérea da planta para o solo por meio da decomposição (Naik et al., 2018; Asigbaase et al., 2021) que é controlada,

basicamente, pelas condições ambientais, comunidade de microrganismos decompositores e pela qualidade do substrato disponível (Fontes et al., 2014). A mineralização da biomassa de vegetal do cacau é essencial para a manutenção do funcionamento dos agroecossistemas de cacau (Yao et al., 2021), pois, na serrapilheira das folhas de cacau, pode ser encontrado de 10 a 45% do estoque total de macronutrientes e até 17% do C total estocando no ecossistema (Hartemink et al., 2005; N'Gbala et al., 2017).

De acordo com Kaba, Yamoah e Acquaye (2021), na África Ocidental, os SAFs de cacau produzem entre cinco e 10 t/ha/ano de matéria seca de resíduos agroflorestais e, segundo Dawoe, Isaac e Quashie-Sam (2010) e Fontes et al. (2014), são nesses resíduos que está uma grande quantidade de nutrientes que podem ser disponibilizados para a cultura do cacau no cultivo consorciado, contribuindo para a manutenção da fertilidade do solo nesses sistemas. Kaba, Yamoah e Acquaye (2021) ressaltam ainda que, além dos macronutrientes (N, P, K) que têm sido bastante estudados, o cálcio (Ca), magnésio (Mg), manganês (Mn) e boro (B) não têm ganhado muita atenção nas pesquisas com sistemas de produção de cacau, apesar de serem ciclados também nesses ecossistemas.

Grandes quantidades de C, N e P são estocadas no solo sob agroflorestas de cacau e podem ser cicladas tornando-as disponíveis para as plantas. Um estudo realizado por Zaia et al. (2012), em agrofloresta de cacau na região tropical do Sul da Bahia, encontraram valores de 9.072, 8.838 e 790 kg ha⁻¹ para estoques médios de C orgânico, N total e P orgânico, respectivamente, em uma camada de 50 cm do solo.

O SAF cacau tem potencial significativo de aporte de P orgânico no solo. Estudos realizados por Aleixo et al. (2017) e Aleixo et al. (2019) mostraram evidências de alta ciclagem e altas concentrações de P orgânico no solo com agroflorestas de cacau na região da Mata Atlântica brasileira. Em estudo realizado com diferentes arranjos de SAF cacau na região Sul da Bahia, Oliveira et al. (2018) observaram que, no arranjo seringueira + cacau, houve aumento em todas as frações de P do solo em relação à área de mata. Observaram também que o reservatório de P orgânico foi a principal fonte de P para o reservatório de P disponível para as plantas.

As concentrações de P, assim como dos demais nutrientes no solo, em sistemas agroflorestais de cacau, podem influenciar as relações C:P e N:P do solo

que, por sua vez, levam à ocorrência da mineralização ou imobilização desses nutrientes (Bai et al., 2022). Nesse contexto, a liberação líquida de nutrientes pelo processo de ciclagem ocorre por vários caminhos e dependem diretamente da concentração de nutrientes no solo, fatores climáticos, qualidade da serrapilheira (concentração de N e P, relações C:N, N:P, lignina e taninos) e composição da fauna do solo (Coleman et al., 2004; Petit-Aldana et al., 2019).

Nesse contexto, os nutrientes liberados pela ciclagem em SAFs de cacau contribuem para o aumento das suas concentrações no solo, alterando a sua estequiometria e seu equilíbrio químico. De acordo com Piaszczyk et al. (2019), o equilíbrio entre o C, N e P é um fator essencial para a regulação da estequiometria do solo que, segundo Wang et al. (2022), é representada pelas proporções de C:N, C:P, N:P e C:N:P que podem ser usadas como indicadores da qualidade do solo. Apesar da importância para a manutenção dos ecossistemas, o equilíbrio entre esses elementos não tem sido muito estudado em sistemas agroflorestais de cacau em regiões tropicais, o que torna importante o desenvolvimento de pesquisas nesse sentido.

Carbono no solo

O solo é o principal reservatório de C da terra, armazenando cerca de 71% de todo o carbono desse compartimento (Lal, 2010; Parras-Alcántara et al., 2015; Clara et al., 2017). O C_o do solo representa 58% da composição da matéria orgânica (MO) que contribui para a proteção física do C e para a manutenção e elevação do seu estoque no solo em sistemas conservacionistas de produção (Nanzer et al., 2019). Por outro lado, em sistemas não convencionais, o baixo aporte de MO e as constantes perturbações no solo fazem com que o C seja facilmente decomposto potencializando as perdas de C do solo (Campbell et al., 2000; Kumar et al., 2020).

A MO é formada por todos os compostos orgânicos carbonados, incluindo microrganismos vivos e mortos, resíduos de plantas e animais parcialmente decompostos ou produtos de sua decomposição, além das substâncias orgânicas (Brandani e Santos, 2009). A MO é a principal fonte de C do solo e está distribuída

tanto na superfície quanto em profundidade, e estima-se que cerca de 46 a 63% do C estocado na camada de um metro do solo seja oriundo da MO armazenada nos horizontes subsuperficiais, principalmente em sistemas florestais (Rumpel e Kögel-Knabner, 2011; Vicente et al., 2016).

Sistemas formados com espécies vegetais de sombra, com grande acúmulo de serrapilheira e com sistemas radiculares profundos, como os sistemas agroflorestais, tem uma alta adição de C no solo, que é estocado tanto nas camadas superficiais como em profundidade (Fontes et al., 2014; Monroe et al., 2016). Nesses sistemas agroflorestais, na profundidade de um metro, o conteúdo de C estocado no solo pode variar de 100–300 Mg ha⁻¹ (Gama-Rodrigues et al., 2010; Monroe et al., 2016; Mattos, 2016).

Apesar dessas observações, historicamente os estudos sobre o armazenamento de C no solo têm se concentrado nos horizontes orgânicos, se estendendo até uma profundidade máxima de 20 cm, não havendo a mesma importância aos horizontes mais profundos (Taylor et al., 2007; Diochon et al., 2009; Innangi et al., 2015). Contudo, com o apelo pela mitigação das altas concentrações de C na atmosfera nos últimos anos, estudos têm mostrado a importância dos horizontes minerais para o estoque de C, principalmente em sistemas florestais (Wang et al., 2010; Rumpel e Kögel-Knabner, 2011; Marty et al., 2015; Kirsten et al., 2016).

Na contramão do que é observado em sistemas florestais consorciados, nos sistemas convencionais de produção ocorre um decréscimo no estoque de carbono orgânico do solo (COS) (Nair et al., 2009; Nair et al., 2012; Traoré et al., 2015; Agevi et al., 2017) e isso está relacionado à ocorrência de processos erosivos, aceleração da mineralização da MOS, oxidação da maior parte do COS, além da baixa capacidade de aporte de material orgânico desses sistemas (Traoré et al., 2015).

A aceleração do processo de mineralização da MOS leva à perda do C do solo em decorrência da decomposição dos resíduos vegetais e da liberação dos elementos da sua composição. A decomposição e estabilização da MO é regulada, principalmente, pela composição do material orgânico (Stewart et al., 2009; Zechmeister-Boltenstern et al., 2015), pelo teor de N (Maluf et al., 2015) e pela relação C:N que determina a competição por elementos essenciais para a atividade dos microrganismos do solo (Luchese et al., 2002), podendo acelerar ou não o processo de decomposição.

Estudos realizados na China para verificar a flexibilidade e a variação temporal e espacial das relações estequiométricas C:N:P, demonstram a ocorrência dessas variações nas camadas superficiais (0–20 cm) do solo de pastagem e floresta, porém, ainda faltam estudos que verifiquem essas variações em perfis de solos mais profundos (Yang et al., 2014; Chen et al., 2016). Mello et al. (1983) mostraram uma tendência de decréscimo na relação C:N no perfil do solo conforme aumento da profundidade. Esse decréscimo pode ser mais ou menos acentuado com o aumento da profundidade no perfil dependendo das características físicas e químicas do solo (Costa, 2004).

O estudo da distribuição COS no perfil é importante em razão da ocorrência da variação no conteúdo e estabilidade do C nas diferentes camadas, influenciadas pela variação das propriedades físicas e químicas no perfil solo (Rumpel e Kögel-Knabner, 2011; Parras-Alcántara et al., 2015), podendo alterar a estequiometria e afetar a estabilização do C e de outros elementos estocados no solo.

Nitrogênio no solo

O nitrogênio (N) está presente no solo nas formas orgânica e inorgânica, deste, aproximadamente 95% é de N orgânico e outros 5% é de N inorgânico e embora as formas inorgânicas de N estejam em menor quantidade no solo, são de grande importância para a nutrição das plantas e para processos relacionados ao ciclo do N (Vieira, 2017).

A entrada do N no ciclo biológico se dá pela deposição do N atmosférico, fixação biológica e adubações químicas ou orgânicas (Cantarella, 2007; Niu et al., 2016; Rodrigues et al., 2017). O solo destaca-se como principal ambiente de ciclagem deste nutriente, com a participação dos microrganismos e de fatores abióticos no processo de mineralização do N da MO (Moreira e Siqueira, 2006).

A fração de N orgânico do solo susceptível à mineralização é denominado de N potencialmente mineralizável (Carvalho et al., 2017), deste, parte pode ser novamente imobilizado após o processo de mineralização do solo (Santos et al., 2020). A fração de N mineralizado do solo é determinada pelo saldo líquido do N

mineralizado e a fração de N imobilizada pelos microrganismos (Quan et al., 2014; Silva et al., 2017).

Vários fatores influenciam o processo de ciclagem do N no solo, sendo a taxa de mineralização e a quantidade de N mineralizado no solo dependentes de fatores como a textura do solo, acidez e teores de C e N, além do balanço de ganho e perda de N no sistema solo-planta (Cabrera et al., 2005; Khalil et al., 2005; Schomberg et al., 2009).

O N total do solo varia em função da classe e textura do solo e do manejo adotado (Coutinho et al., 2010). Dessa forma, a maior proteção do N orgânico e o seu maior acúmulo ocorrem em solos com textura argilosa, podendo atingir de 800 a 6.000 kg ha⁻¹ na camada 0–20 cm em solos minerais (Cantarella, 2007).

Estudos desenvolvidos para a quantificação de N total (N_T) no solo demonstraram que em sistema agroflorestal e silvipastoril foram encontrados estoques de 3 e 4 Mg ha⁻¹ de N, respectivamente, na profundidade de 30 cm (Gelaw et al., 2014) e em solos com diferentes arranjos de SAFs, na profundidade de até 60 cm foram encontrados estoques de N na faixa de 36–54 Mg ha⁻¹ (Kassa et al., 2017).

Song et al. (2016) demonstram que o comportamento do N_T do solo se assemelha ao do C_O, de forma a apresentar decréscimo no perfil do solo, estabilizando-se nos horizontes mais profundos, reafirmando a importância de estudar o potencial de acúmulo de C e N na profundidade de até 1 metro em diferentes sistemas de uso da terra (Oliveira et al., 2019).

O N também influencia na ciclagem de outros elementos como C, P e o enxofre (S) no solo, pois é um elemento essencial para a manutenção dos ciclos biogeoquímicos e do acoplamento do ciclo do C e N, de forma que o seu teor influencia na regulação da atividade de mineralização e imobilização de nutrientes (Zhou et al., 2017a; Chen et al., 2019).

A adubação nitrogenada, por exemplo, é um fator que interfere na ciclagem e na distribuição das formas de P no solo, uma vez que o nitrogênio aumenta a biomassa da planta e a adição de resíduos ao solo (Santi et al., 2003; Leite et al., 2016). Embora haja evidências da relação do uso da adubação nitrogenada com o aumento da taxa de mineralização e diminuição da adsorção de P, Yang et al. (2015) mostram que, no balanço dos elementos, a quantidade de P disponível diminui nessas condições.

Fósforo no solo

O fósforo (P) presente no solo é dividido basicamente em dois grandes grupos que fazem parte do ciclo do P no solo: P orgânico (P_o) e P inorgânico (P_i). O ciclo do P no solo é constituído por três mecanismos de entradas de P, cinco *pools* (reservatórios), quatro tipos de reações e pelas formas de perdas do P do solo (Nunes, 2014; Marafon, 2017). As entradas se dão pelo intemperismo dos minerais das rochas, via material orgânico vegetal e animal, por fertilizantes (agricultura), pela serrapilheira (ecossistemas naturais e manejados) e por fontes atmosféricas (poeiras e aerossóis) (Tipping et al., 2014).

Os *pools* do P no solo são: P sorvido, P solução, P matéria orgânica morta, P da biomassa microbiana, P precipitado (fosfatos - Ca, Al, Fe), onde dentro de cada um desses compartimentos podem ocorrer reações do P com outros compostos, dependendo das condições ambientais, ou sofrer perdas pelas três vias possíveis: erosão, lixiviação e absorção pelas plantas (Kruse et al., 2015).

O fósforo orgânico (P_o), em sua maioria, é oriundo dos resíduos vegetais adicionados ao solo, dos produtos da sua decomposição e do tecido microbiano (Souza Júnior, 2009). No processo de mineralização, antes que o P seja liberado no solo, primeiramente é incorporado pelos microrganismos por tempo suficiente para que ocorra o decréscimo do C, reduzindo a relação C:P dos resíduos aos valores equivalentes ao da biomassa microbiana de forma a viabilizar a mineralização (Novais et al., 2007).

Em solos tropicais, altamente intemperizados, onde em sua maioria são pobres em nutrientes e ricos em oxi-hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), a fração do P_o mineralizado ganha mais importância na nutrição da planta, pois nessas condições há deficiência de P no solo, devido aos baixos teores de P total e a forte adsorção pelos hidróxidos de Fe e Al (Zaia et al., 2008), havendo assim, uma aceleração na ciclagem do P orgânico lábil (Silva e Mendonça, 2007).

De acordo com Guerra et al. (1996) e Cunha et al. (2007), o P_o pode representar a maior parte do P disponível no solo, podendo participar com quantidades que variam de 3 a 90% do P total do solo ou de 1 a 3% da matéria orgânica do solo (Moreira e Siqueira, 2001).

A liberação de formas orgânicas de P no solo, mais móveis e menos susceptíveis às reações de adsorção, é favorecida em decorrência da imobilização do P no tecido da biomassa microbiana e pelo processo de mineralização lenta e gradual dos resíduos orgânicos vegetais, viabilizando a absorção e o aproveitamento da fração orgânica de P mineralizado do solo pelas plantas (Conte et al., 2002; Rheinheimer e Anghinoni, 2003; Martinazzo et al., 2007; Oliveira et al., 2011).

Os sistemas com grande aporte de matéria orgânica podem favorecer a manutenção do *pool* de P_o e contribuir para a disponibilidade de P na solução do solo para a absorção das plantas, através da sua mineralização (Szott e Melendez, 2001; Lehmann et al., 2001). Estudos como os de Zaia et al. (2008, 2012), Costa et al. (2016), Sales et al. (2017) e Aleixo et al. (2017, 2019) buscam compreender a dinâmica do P_o no solo e a sua contribuição para a ciclagem de P em sistemas florestais e agroflorestais, porém, tais estudos têm-se limitado às camadas superficiais do solo até uma profundidade de 50 cm.

O grupo do fósforo inorgânico pode ser dividido nos subgrupos: P estrutural originado dos minerais primários, P adsorvido e o P da solução do solo, sendo este encontrado em menor quantidade (Gatiboni, 2003). O P inorgânico do solo é representado pelos íons fosfatos, P estrutural dos minerais fosfatados e todas as formas de fosfato precipitados com compostos inorgânicos ou adsorvidos a ele (Ohland, 2019).

A dinâmica de participação de cada uma das formas de P do solo na disponibilidade desse nutriente para as plantas depende de vários fatores, como: adubação fosfatada (Leite et al., 2016), sistema de preparo do solo, quantidade de P exportado na colheita, taxa de reposição do P exportado do sistema e a habilidade das plantas em utilizar as reservas de P encontradas em formas menos lábeis (Takahashi e Anwar, 2007; Tiecher et al., 2012). Dessa forma, torna-se ainda mais relevante a realização de estudos sobre a dinâmica e as condições que favorecem a disponibilidade desse elemento no solo em função dos fatores que o controlam.

Relação estequiométrica C:N:P no solo

O equilíbrio das substâncias químicas envolvidas nos processos ecológicos, conhecido como estequiometria ecológica (Sturner e Elser, 2002), tem sido usada para avaliar a influência do balanço dessas substâncias nas interações ecológicas em vários ecossistemas, aquáticos e terrestres (Sturner e Elser, 2002; Ågren, 2008; Hessen et al., 2013).

Os elementos mais estudados na estequiometria ecológica são: C, N e P, por se tratar dos elementos que mais limitam o crescimento e desenvolvimento dos organismos vivos (Elser et al., 2007; Frossard et al., 2016). Na ciência do solo, estudos com estequiometria têm focado, principalmente, na compreensão da estabilização e mineralização da MOS e liberação de nutrientes para as plantas (Gressel et al., 1996; Kirkby et al., 2013; Cotrufo et al., 2015; Kirkby et al., 2016; Fang et al., 2019).

As razões estequiométricas C:N, C:P e N:P assumem grande importância nos estudos do solo, uma vez que estas têm sido apontadas como indicadoras de qualidade da MO (Zhang et al., 2011; Ostrowska e Porębska, 2015), da taxa de decomposição da matéria orgânica (Paul, 2007) e como fatores relacionados às restrições de nutrientes em ecossistemas (Peñuelas et al., 2012 e Bui e Henderson, 2013).

Na dinâmica da MO, os processos de mineralização e de imobilização são regulados pelo balanço da quantidade de nutriente disponível para os microrganismos no substrato orgânico e pela demanda real dos microrganismos por nutrientes (Manzoni et al., 2008; Manzoni et al., 2017), processos controlados pela atividade microbiana do solo e que libera nutrientes essenciais como N e P na solução do solo, tornando-os disponíveis para as plantas na forma mineralizada (Manzoni et al., 2010).

A mineralização dos elementos N e P, assim como do S presente na MOS, ocorre simultaneamente com a do C, de forma que há uma dependência da relação entre eles na regulação do processo de mineralização e imobilização, havendo a mineralização líquida desses nutrientes quando as relações C:N, C:P forem menores que 30 e 200, respectivamente (Silva e Mendonça, 2007). Ainda de acordo com os autores, os limites proporcionais dos elementos entre a mineralização e

imobilização, são determinados pelo requerimento relativo de N e pelos microrganismos em relação ao de P.

A relação N:P ainda é pouco estudada e as poucas pesquisas sobre a influência do P sobre a mineralização do N apresentaram dados inconclusivos (Silva et al., 1999), sugerindo a necessidade de pesquisas mais aprofundadas com relação às proporções de N e P do solo e o processo de mineralização da matéria orgânica.

A relação estequiométrica mais estudada em sistemas agrícolas é a relação C:N, principalmente em avaliações da sua influência sobre a matéria orgânica no processo de ciclagem de nutrientes em diferentes sistemas de uso do solo (Gama-Rodrigues et al., 2007; Hentz et al., 2014; Holanda et al., 2015; Foloni et al., 2016). Tal importância é dada a esses estudos pelo fato das interações entre biomassa microbiana e a serrapilheira serem afetadas pela qualidade e composição química do material orgânico que, por sua vez, é influenciado pela diversidade da composição das espécies vegetais (Hättenschwiler e Jørgensen, 2010; Ndaw et al., 2009; Souza et al., 2012).

A relação C:N também tem forte influência na velocidade do processo de decomposição e mineralização da matéria orgânica para disponibilização dos nutrientes, pois uma alta relação C:N pode diminuir a atividade microbiana, diminuindo também a mineralização (Luchese et al., 2002). Nesse sentido, no estabelecimento de ecossistemas é importante considerar a combinação de espécies vegetais que proporcionem uma menor relação C:N do material orgânico, com potencial para viabilizar uma maior atividade microbiana no solo e a maximização da ciclagem dos nutrientes (Vasconcellos et al., 2013).

Vários fatores podem influenciar nas relações C:N, C:P e N:P no solo, dentre eles destacam-se as práticas de manejo, uso da terra, uso de fogo no preparo da terra, clima, topografia e fatores abióticos (Bui e Henderson, 2013; Bing et al., 2016; Yuan et al., 2017; Tang et al., 2018). Estudos realizados na China por Li et al. (2012) e Tian et al. (2010) demonstraram que a mudança no tipo de uso da terra influencia fortemente a estequiometria do solo, assim como o clima, a ordem do solo, a profundidade do solo e o estágio de intemperismo regulam as suas variações.

Hui et al. (2021), ao analisarem a variação espacial e vertical das relações estequiométricas de C:N:P em solos sob florestas tropicais da China, com relação aos seus fatores de influência, a topografia, o tipo de solo e a prática de manejo,

observaram que estes influenciaram significativamente sobre a razão C:N no perfil do solo, até a profundidade de 1 metro. Também observaram que esses fatores, com exceção do tipo de solo, somados aos fatores climáticos, como temperatura e precipitação, influenciaram significativamente na relação C:P em todo o perfil do solo.

Outro fator que altera fortemente a estequiometria de C:N:P são as concentrações desses elementos nos solos dos ecossistemas. Nesse sentido, Zaia et al. (2012) demonstraram que o conteúdo de P orgânico total aumentou de 19,7% na camada de 5–15 cm para 55% na camada de 30–50 cm do solo, indicando que há uma grande quantidade de P_o estocado nas camadas subsuperficiais do solo, da qual ainda não foi estudada a sua participação na ciclagem desse elemento e na disponibilidade P na solução do solo.

Com relação à concentração de P_o nas frações de tamanho de partículas do solo, Spohn (2020a) avaliando a concentração de P_i , P_o e C_o , observou nas camadas de 0–10 e 10–20 cm, que a fração de tamanho argila apresentou maior concentração de P_o em relação às frações de tamanho areia e silte, com 1030, 474, 110 $mg\ kg^{-1}$ na primeira camada e 1041, 66, 454 $mg\ kg^{-1}$ na segunda camada, respectivamente, além de razões molares médias de $C_o:P_o$ de 771 para areia, 424 para silte e 204 para argila, mostrando uma influência do tipo solo no teor dos elementos e na estequiometria. O estudo mostrou ainda que, nas camadas abaixo de 35 cm de profundidade, as concentrações de P_o do silte e argila tiveram uma queda considerável ficando abaixo de 500 $mg\ kg^{-1}$.

As concentrações de C, N e P no perfil do solo sob florestas tropicais na China foram estudadas por Hui et al. (2021) e, neste estudo, foi observada uma queda nos teores dos elementos com o aumento da profundidade do perfil do solo, com valores reduzindo da camada de 0–10 cm para a camada de 50–100 cm de 23,87 para 7,29 $mg\ kg^{-1}$ de C, de 1,65 para 0,60 $mg\ kg^{-1}$ de N e de 0,41 para 0,33 $mg\ kg^{-1}$ de P, respectivamente. Os autores também observaram uma redução nos valores da relação C:N, C:P e N:P com o aumento da profundidade do solo, influenciada pela diminuição nos teores do elemento em profundidade, de 16,28 para 15,94 na relação C:N, de 79,73 para 37,46 na relação C:P e de 5,41 para 2,97 na relação N:P, nas mesmas camadas.

Com relação ao estudo das razões estequiométricas e o conteúdo desses elementos no solo, alguns estudos (Santos, 2007; Mafra et al., 2008; Rangel et al.,

2008; Canellas et al., 2013; Guareschi et al., 2014; Abrão et al., 2015; Sales et al., 2018) mostram a variação nos teores de C e N e relação C:N no perfil de diferentes solos em uso com os principais cultivos da agricultura brasileira. Contudo, dados das relações C:P e N:P no perfil do solo ainda são escassos na literatura e, por essa razão, não foram citados neste trabalho.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido com amostras de solos coletadas na Estação Experimental Djalma Bahia (EDJAB), no município de Una, Bahia, Brasil ($15^{\circ} 16' S$, $30^{\circ} 4' W$), e no Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC), situado na sede da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), no município de Ilhéus, Bahia, Brasil ($14^{\circ} 47' S$ $39^{\circ} 02' W$) (Figura 1).

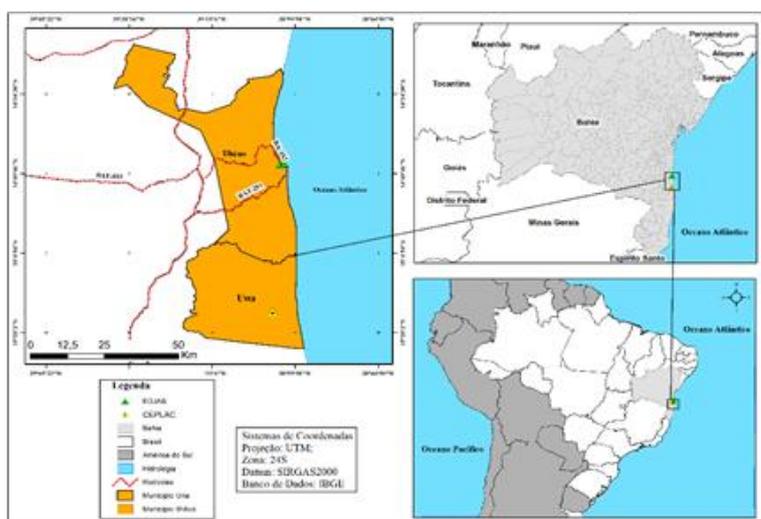


Figura 1. Localização dos municípios de Ilhéus e Uno no estado da Bahia, Brasil.

A região é caracterizada pelo clima AF da classificação de Köppen e Geiger, com temperatura média de $25^{\circ}C$ e pluviosidade média de 2.000 mm. Na área de estudo foram identificadas três classes de solos de acordo com a Embrapa (2013), sendo estas: Argissolo Amarelo, Argissolo Acinzentado e Nitossolo Háplico. As classes de solos, os sistemas de uso da terra, tempo de manejo (idade) e o manejo adotado, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição dos diferentes sistemas de uso da terra nos onze sítios e nas três classes de solos.

Sítio	Classe de solo	Sistema de uso	Idade (ano)	Manejo
1		Floresta natural	-	Fragmento de Mata Atlântica
2	Argissolo Amarelo	Pastagem	30	<i>Brachiaria decumbens</i> , antes da instalação a área passou por período de abandono com predomínio de plantas daninhas.
3		Seringueira	35	Monocultivo de Seringueira com espaçamento de 7x3 m.
4		Floresta natural	-	Fragmento de Mata Atlântica.
5		Pastagem	8	<i>Brachiaria decumbens</i> em substituição à floresta natural.
6	Argissolo Acinzentado	Seringueira (monocultura)	40	Monocultivo de Seringueira com espaçamento de 7x3 m.
7		Seringueira + Açaí	30	Seringueira (<i>Hevea brasiliensis</i>) + açaí (<i>Euterpe oleraceae</i>): fileira simples com espaçamento de 7x3 m para a Seringueira e para o açaí.
8		Seringueira + Cacau	35	Seringueira + cacau (<i>Theobroma cacao</i>): espaçamento 7x3 m para a Seringueira entre fileira dupla de cacau com espaçamento de 2x2 m.
9	Nitossolo Háplico	Seringueira + Cacau	8	Seringueira + cacau (<i>Theobroma cacao</i>): espaçamento 7x4x3 m para a Seringueira entre fileira dupla de cacau com espaçamento de 2x2,5 m.
10		Eritrina + Cacau	30	<i>Erythrina (Erythrina glauca Lour.)</i> com espaçamento de 25x25 m, árvores de cacau com espaçamento de 3x3 m.

Em cada área foram delimitadas três parcelas de 30 m², separadas por aproximadamente 100 m de distância, na parte central de cada sistema, onde foram abertas trincheiras nas dimensões de 1 x 1 x 1,5 m (comprimento x largura X profundidade), nas entrelinhas das culturas. Em cada trincheira foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Na sequência, as amostras foram secas ao ar e peneiradas a 2 mm de malha, para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Além disso, foram coletadas amostras indeformadas em anéis volumétricos de 100 cm³ para determinar a densidade dos solos (Embrapa, 1997).

Análise física e química

Os dados de caracterização na camada de 0-10 cm dos solos foram retirados do trabalho de Viana (2016) onde os atributos químicos dos solos foram determinados de acordo com métodos da EMBRAPA (1999), sendo o pH mensurado em suspensão de solos em água deionizada com auxílio de eletrodo de vidro e as bases Ca, Mg e Al trocáveis foram extraídas por KCl a 1 mol e determinada por espectrofotometria de absorção atômica. O K foi extraído por Mehlich1 e determinado por espectrofotometria de emissão de chama. Para a determinação da acidez potencial, a extração de H + Al foi realizada com 0,5 cm³ de TFSA mais 75 ml de solução de Ca (CH₃COO)₂ H₂O 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0 adicionados a um erlenmeyer de 125 ml, sendo o sobrenadante titulado com NaOH 0,025 mol.

A soma de bases (SB) foi determinada pela soma de Ca²⁺ + K⁺ + Mg²⁺ e a capacidade de troca catiônica a pH 7 (CTC pH7) pela SB + (H⁺+Al³⁺). A saturação por bases (V%) foi determinada pela fórmula: (SB/CTC) x 100. O P_T foi extraído com NaOH+Na₂EDTA, de acordo com Bowman e Moir (1993), modificado e determinado por espectrofotometria a 880 nm (Murphy e Riley, 1962) após digestão em autoclave com persulfato de amônio e H₂SO₄. A densidade do solo foi determinada de acordo com a Embrapa (1997) com amostras indeformadas e a granulometria pelo método da pipeta com amostras deformadas dos primeiros 10

cm do solo. Os dados dos atributos químicos e físicos dos solos podem ser observados na Tabela 2.

Os dados de C orgânico, N total e P orgânico são oriundos das teses de Viana (2016), Mattos (2016) e da dissertação de Oliveira (2016). A determinação do C orgânico total (C_{OT}) e N total (N_T) foi por combustão seca em analisador elementar automatizado Perkin-Elmer Series II 2400 CHNS/O Analyze.

O P_O total foi determinado por meio de extração com NaOH+Na₂EDTA (Bowman e Moir, 1993) modificada, onde amostras de 0,5 g TFSA, adicionadas aos tubos de 15 ml foram colocadas sob agitação por 16 horas em agitador horizontal a 120 rpm, seguida de centrifugação por 20 minutos a 6000 rpm. As concentrações de P_i nos extratos foram determinadas por colorimetria para P reativo ao molibdato de amônio em SPECORD 210 PLUS (Analytik Jena, Jena, DE), por espectrofotometria a 700 nm (Dick e Tabatabai, 1977). O P_T foi determinado por espectrofotometria a 880 nm (Murphy e Riley, 1962) após digestão em autoclave com persulfato de amônio e H₂SO₄. O P_O foi então calculado pela diferença entre as concentrações de P_T e P_i em cada extrato de NaOH+Na₂EDTA.

Para a determinação das razões estequiométricas, os teores dos elementos foram transformados em mol pela massa molar de C, N e P. As razões estequiométricas C:N, C: P_O , N: P_O e C:N: P_O foram calculadas pela divisão da concentração dos elementos (mol) pelo de menor valor, obtendo as razões estequiométricas molares para cada camada de solo.

Tabela 2. Atributos físicos e químicos das camadas de 0-10 cm dos solos de diferentes classes, sob diferentes sistemas de uso da terra na Região Sul da Bahia.

Parâmetros	Sistemas									
	Argissolo Amarelo			Argissolo Acinzentado					Nitossolo Háplico	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Argila (g kg ⁻¹)	115,6	91,40	237,4	456,9	426,4	483,8	489,5	573,0	523,6	562,5
pH	4,20	4,12	3,84	4,52	4,34	3,68	3,37	3,53	5,60	5,72
C total (g kg ⁻¹)	21,60	10,20	9,50	25,60	20,90	15,90	21,40	19,60	21,50	37,80
N total (g kg ⁻¹)	1,11	0,78	0,85	2,19	1,18	1,03	1,18	1,28	2,18	3,01
P total (mg kg ⁻¹)	667,5	629,5	627,0	591,5	594,0	659,9	913,2	1009,5	3036,2	4474,0
P Mehlich ⁻¹ (mg dm ⁻³)	2,07	1,93	3,80	2,20	1,97	3,27	3,67	5,47	5,07	7,50
K ⁺ (mg kg ⁻¹)	29,67	63,67	7,50	25,00	34,00	19,00	25,33	24,67	29,67	34,67
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,87	1,03	0,13	0,13	1,37	0,20	0,40	0,50	4,30	13,43
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,37	0,50	0,10	0,40	0,50	0,20	0,20	0,50	3,03	4,70
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,70	0,40	0,70	1,20	0,40	1,40	1,90	1,40	0,10	0,00
SB (cmol _c dm ⁻³)	1,32	1,69	0,25	0,59	1,96	0,45	0,67	1,06	7,41	18,30
T (cmol _c dm ⁻³)	4,92	5,82	2,42	3,89	11,26	7,68	6,87	8,83	17,88	23,50
V (%)	26,83	29,04	10,33	15,17	17,41	5,86	9,75	12,00	41,44	77,87

Sistemas: Mata (1), Pastagem (2(1) Mata, (2) pastagem (2), Monocultivo de Seringueira (3), Mata (4), Pastagem (5), Monocultivo de Seringueira (6), Seringueira-Açaí (7), Seringueira-Cacau (8), Eritrina-Cacau (9), Seringueira-Cacau (10). Os sistemas de 1 a 3 estão dispostos sob Argissolo Amarelo; de 4 a 8 sob Argissolo Acinzentado e de 9 a 10 sob Nitossolo Háplico. Fonte: Viana (2016).

Análises dos dados

Cada sítio foi considerado um tratamento de efeito-fixo, em vista à ocorrência de diversas fontes de variação, tais como: quatro composições de sistemas agroflorestais, dois monocultivos de seringueira, duas florestas naturais e duas pastagens. Adotou-se também a pseudo-repetição para as três parcelas fixas de cada sítio, como descrito por Dawoe et al. (2010) e Fontes et al. (2014) em sistemas florestais e agroflorestais.

A normalidade dos dados foi testada pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade pelo teste de Levene ao nível de significância de 5%. Para atender aos pressupostos de normalidade e homogeneidade, os dados foram submetidos à transformação de Box-Cox (Box e Cox, 1964) com o pacote “*forecast*” no programa R 4.1.2 (R Core Team, 2021). Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para testar a hipótese nula de igualdade de médias a 5% por meio do teste F de Snedecor e, em seguida, foram realizadas as comparações das médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para gerar o agrupamento das médias entre os sítios avaliados e análise de regressão linear simples para as razões estequiométricas. Os dados foram analisados utilizando o programa R 4.1.2 (R Core Team, 2021) com o pacote “*ExpDes.pl*” e o *software* SigmaPlot 14.5 foi usado para a plotagem dos gráficos.

Os dados das concentrações e razões estequiométricas entre C, N, P foram submetidos à análise dos componentes principais (PCA), para determinar o grau de similaridade entre os sistemas de uso da terra e as classes de solos através de diagrama gráfico com eixos de ordenação. As análises foram realizadas no programa R 4.1.2 (R Core Team, 2021) com o pacote “*tidyverse*” e a plotagem do gráfico com o pacote ‘*factoextra*’ (Kassambara e Mundt, 2017).

RESULTADOS

Concentração de C, N e P no solo

A distribuição da concentração de C_{OT} , N_T , P_O no perfil do solo mostrou que o N_T apresentou pequena variação no perfil do solo das classes Argissolo Amarelo e Argissolo Acinzentado, sendo observada uma diminuição mais acentuada no sistema eritrina-cacau do Nitossolo Háplico (Figura 2 F). Os teores de C_{OT} , P_O se comportaram de forma decrescente no perfil do solo em todos os sistemas estudados (Figura 2 A, B, C, G, H, I).

A maior concentração dos elementos por camada, em relação à quantidade total dos elementos ($kg\ ha^{-1}$) no perfil do solo, foi observada nas camadas superiores, apresentando concentrações acima de 50% até a profundidade de 20 cm para C_{OT} e P_O , nas três classes de solos, com exceção da mata e pastagem no Argissolo Amarelo e seringueira-cacau no Nitossolo Háplico que apresentaram concentrações inferiores a 50% nesta camada (Tabela 3). O N_T apresentou concentrações abaixo de 50% em todos os sistemas na camada de 0-20 cm do solo. O C_{OT} variou de 37 a 64% na camada de 0 a 20 cm entre os sistemas, sendo que a maior concentração foi observada no SAF eritrina-cacau no Nitossolo Háplico e a menor no sistema de pastagem no Argissolo Amarelo (Tabela 3).

Cerca de 30 a 40% do N_T , em relação ao total no perfil, estava nas camadas superiores, até 20 cm de profundidade, em todos os sistemas e classes de solos, porém, se considerar as camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, a variação entre elas foi pequena em todos os sistemas em comparação com os demais elementos (Tabela 3). O P_O apresentou comportamento parecido com o do C, com a maior concentração nos primeiros 20 cm dos solos, sendo observadas concentrações superiores às do C na mesma camada, porém, na última camada (80-100), apenas de 1 a 5% do P_O foi encontrado nos sistemas em todas as classes de solos. As maiores concentrações de P_O foram encontradas nos sistemas de mata (71%) e pastagem (71%) no Argissolo Amarelo e monocultivo de seringueira (70%) no Argissolo Acinzentado (Tabela 3).

Tabela 3. Porcentagem de C_{OT} , N_T e P_O nas camadas 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 de solos das classes Argissolo Amarelo, Argissolo Acinzentado e Nitossolo Háplico sob diferentes sistemas de uso no Sul da Bahia, Brasil.

Sistemas	C_{OT} (%)						
	0-10	10-20	*0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
1	19	21	40	21	16	13	10
2	20	17	37	14	20	16	13
3	26	26	52	17	12	10	9
4	35	20	55	17	13	9	6
5	30	26	56	16	10	9	8
6	30	20	50	16	13	11	10
7	31	21	52	16	13	10	9
8	34	20	54	15	12	10	9
9	29	19	48	16	12	12	12
10	41	23	64	12	10	8	7
Sistemas	N_T (%)						
	0-10	10-20	*0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
1	17	16	33	17	17	17	16
2	17	16	34	16	17	17	16
3	21	20	41	16	15	14	14
4	25	20	45	18	13	12	12
5	22	21	43	18	17	16	5
6	19	17	36	16	16	16	15
7	19	18	37	16	16	15	15
8	21	17	38	16	15	15	16
9	18	17	34	16	16	16	19
10	26	19	46	15	14	13	13
Sistemas	P_O (%)						
	0-10	10-20	*0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
1	38	33	71	15	8	4	2
2	42	30	71	16	6	5	1
3	40	23	63	19	9	6	2
4	35	33	68	17	10	4	1
5	37	31	68	16	8	6	2
6	38	32	70	16	10	3	2
7	35	29	64	16	11	6	3
8	34	26	61	18	11	7	3
9	35	29	65	18	9	5	3
10	36	27	63	15	9	8	5

*Porcentagem de cada elemento considerando-se a camada de 0-20 cm do solo. Sistemas: Mata (1), Pastagem (2), Monocultivo de Seringueira (3), Mata (4), Pastagem (5), Monocultivo de Seringueira (6), Seringueira-Açaí (7), Seringueira-Cacau (8), Seringueira-Cacau (9), Eritrina-Cacau (10). Os sistemas de 1 a 3 estão dispostos sob Argissolo Amarelo; de 4 a 8 sob Argissolo Acinzentado e de 9 a 10 sob Nitossolo Háplico.

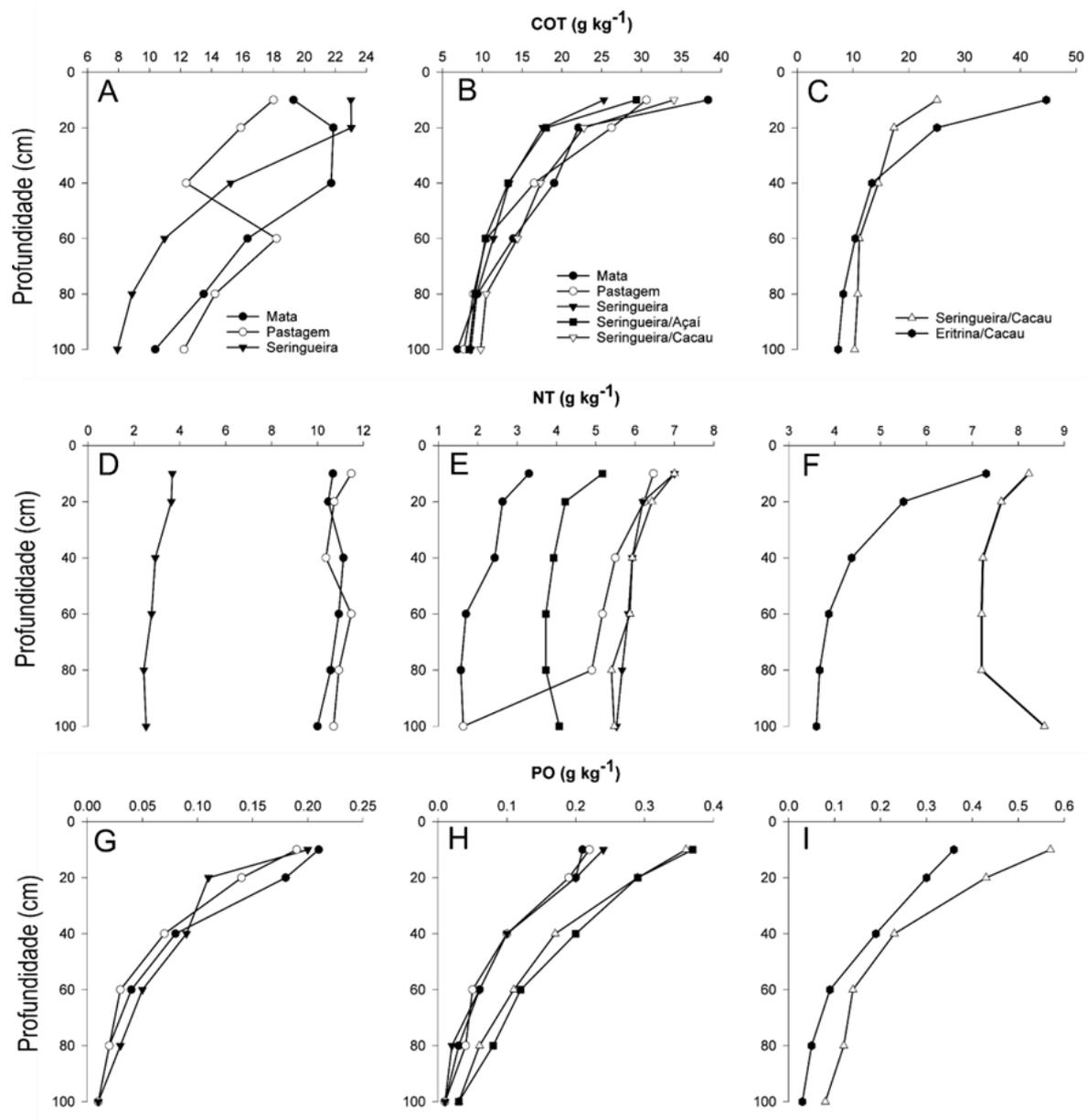


Figura 2. Distribuição dos teores de carbono orgânico total (C_{OT}), nitrogênio total (N_T) e fósforo orgânico (P_O) no perfil do solo, no Sul da Bahia, Brasil. As figuras (A), (D) e (G) correspondem aos sistemas sobre Argissolo Amarelo; (B), (E) e (H) ao Argissolo Acinzentado e (C), (F) e (I) ao Nitossolo Háplico.

Análise dos componentes principais (PCA)

A análise dos componentes principais (PCA) para as relações C:N, C:P_o, N:P_o e os teores de C_{OT}, N_T, P_o nas diferentes classes e sistemas de uso do solo, mostrou que os SAFs seringueira-açaí e seringueira-cacau no Argissolo Acinzentado e seringueira-cacau e eritrina-cacau no Nitossolo Háplico se comportaram de forma parecida com relação ao P_o, da mesma forma que mata e monocultivo de seringueira no Argissolo Amarelo e mata e pastagem no Argissolo Acinzentado foram semelhantes em relação à C:N, N:P_o, C:P_o, N_T e C_{OT}.

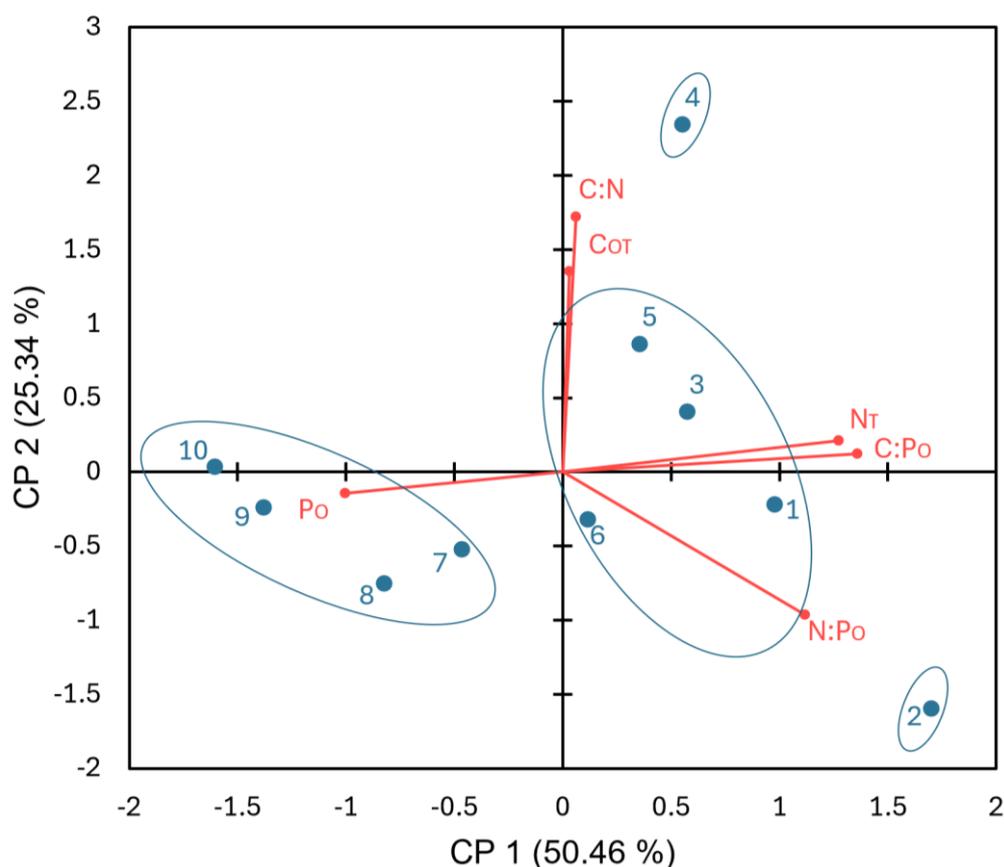


Figura 3. Associação das variáveis C:N, C:P_o, N:P_o, C_{OT}, N_T e P_o aos eixos dos componentes principais. (1) mata, (2) pastagem (3) monocultivo de seringueira no Argissolo Amarelo. (4) mata, (5) pastagem, (6) monocultivo de seringueira, (7) seringueira-açaí, (8) seringueira-cacau no Argissolo Acinzentado. (9) seringueira-cacau, (10) eritrina-cacau no Nitossolo Háplico.

A PCA apresentou variância acumulada de 75,80% para os dois primeiros componentes principais. As variáveis relação C:N, C_{OT} , N_T e C:P_O se correlacionaram positivamente com o componente principal 1 (CP1), estando posicionado do lado superior do eixo deste CP e as variáveis P_O e N:P_O se correlacionaram negativamente com o CP1, estando posicionadas do lado inferior do eixo (Figura 3). As variáveis C:P_O, N_T e N:P_O foram as mais representativas na associação com o CP1, apresentando valores de 0,99, 0,93, 0,81, respectivamente, na carga de associação ao componente principal. Para o componente principal 2 (CP2), a variável P_O se correlacionou negativamente, estando posicionada no lado esquerdo do eixo correspondente ao CP2, em oposição a C:N, C_{OT} , C:P_O, N:P_O e N_T que se posicionaram do lado direito do eixo, se correlacionando positivamente com ele (Figura 3). A relação C:N, C_{OT} e N:P_O se destacaram com maior representatividade na carga de associação para o CP2, apresentando correlação de 0,88, 0,69 e 0,49, respectivamente.

Comportamento da relação C:N, C:P_O e N:P_O no perfil do solo

A relação C:N apresentou valores baixos e com pouca variação no perfil de todas as classes de solo, em todos os sistemas de uso. Os sistemas que apresentaram maiores variações entre camadas foram o monocultivo de seringueira, mata e SAF eritrina-cacau, no Argissolo Amarelo, Argissolo Acinzentado e Nitossolo Háplico, respectivamente, sendo os maiores valores encontrados na camada superficial, decrescendo com o aumento da profundidade. No Argissolo Amarelo os sistemas de mata e monocultivo de seringueira apresentaram distribuição linear significativa ($p < 0,01$), diferindo do sistema de pastagem que não se ajustou significativamente a esse modelo de distribuição (Figura 4, A, B, C). Para o Argissolo Acinzentado, a relação C:N se ajustou significativamente ($p < 0,01$) à distribuição linear nos sistemas de uso do solo, com exceção da mata e do pasto. (Figura 4 D, E, F, G, H). No Nitossolo Háplico, a relação C:N apresentou distribuição linear significativa ($p < 0,01$) nos dois sistemas agroflorestais (Figura 4 I, J).

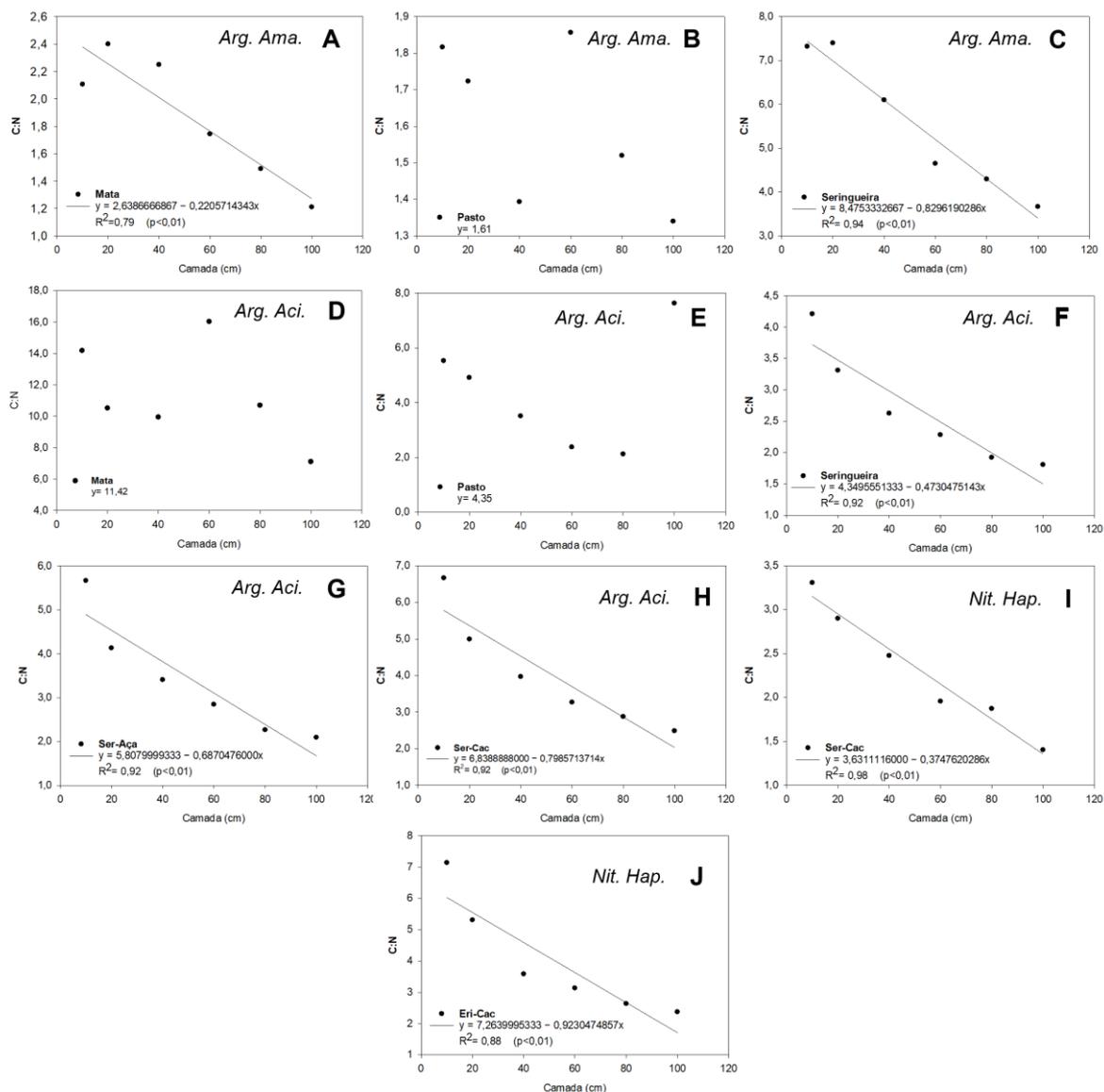


Figura 4. Distribuição linear da relação C:N no perfil do solo. Figuras (A), (B) e (C) correspondem aos sistemas mata, pastagem e monocultivo de seringueira no Argissolo Amarelo, respectivamente. As figuras (D), (E), (F), (G) e (H) correspondem aos sistemas mata, pastagem, monocultivo de seringueira, seringueira-açaí e seringueira-cacau no Argissolo Acinzentado, respectivamente. As figuras (I) e (J) correspondem aos sistemas seringueira-cacau e eritrina-cacau, no Nitossolo Háplico, respectivamente.

Na comparação de médias para relação C:N no Argissolo Amarelo, os sistemas de mata e pastagem diferiram entre si apenas na camada de 20-40 cm do solo, e o sistema de monocultivo de seringueira diferiu de ambos em todas as camadas a 5 % pelo teste Tukey (Figura 5 A). No Argissolo Acinzentado, na camada de 0-10 cm, apenas a mata e monocultivo de seringueira diferiram entre si pelo teste Tukey a 5%. Já na camada de 10-20 cm, o sistema de mata diferiu do monocultivo de seringueira e do SAF seringueira-açaí, e os demais não diferiram entre si (Figura 5 B). Na camada de 20-40 cm, houve diferença significativa entre a mata e os demais sistemas, e o monocultivo de seringueira diferiu apenas desta e do SAF seringueira-cacau (Figura 5 B). Já na camada de 40-60 cm, a mata diferiu de todos os sistemas, e o monocultivo de seringueira diferiu da mata e do sistema seringueira-cacau; os demais não diferiram entre si a 5% (Figura 5 B). Na camada de 60-80 cm a mata diferiu de todos os sistemas, e o sistema seringueira-açaí diferiu da mata e não diferiu dos demais, a pastagem e o monocultivo de seringueira não diferiram entre si e nem do sistema seringueira-açaí, mas diferiram dos demais e o sistema seringueira-cacau não diferiu apenas do sistema seringueira-açaí (Figura 5 B). Na camada de 80-100 cm, mata e pastagem não diferiram entre si e ambas diferiram dos demais sistemas (Figura 5 B). O sistema seringueira-açaí não diferiu do monocultivo de seringueira e do sistema seringueira-cacau e estes diferiram entre si a 5 % pelo teste Tukey (Figura 5 B). No Nitossolo Háplico os sistemas diferiram entre si em todas as camadas para a relação C:N, na comparação de médias pelo teste Tukey a 5% (Figura 5C).

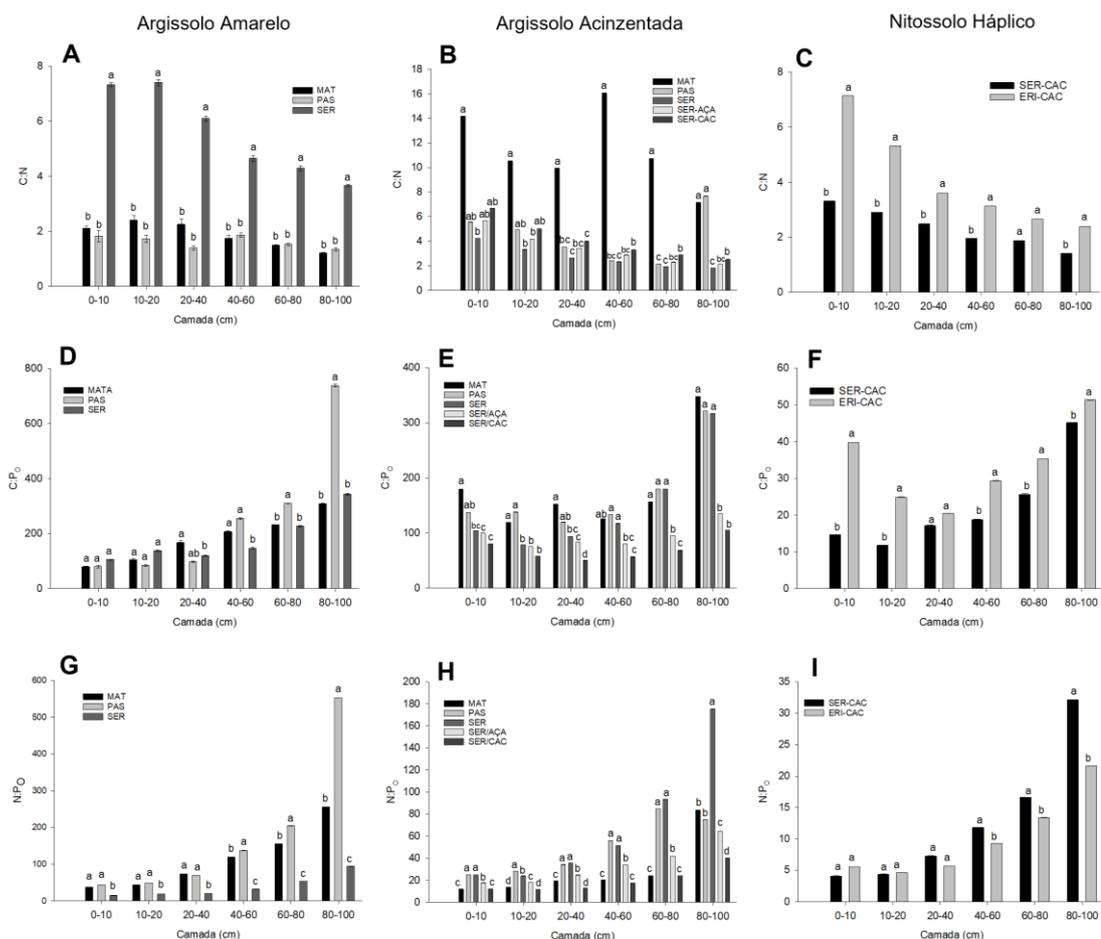


Figura 5. Comparação de médias para relação C:N, C:P_o e N:P_o nos sistemas sobre Argissolo Amarelo (A, D e G), Argissolo Acinzentada (B, E e H) e Nitossolo Háplico (C, F e I), pelo teste Tukey a 5%.

A relação C:P_o apresentou grande variação e comportamento crescente com o aumento da profundidade das camadas das três classes de solos e em todos os sistemas de uso, sendo observados os maiores valores desta variável nas camadas abaixo de 60 cm e os menores nas camadas superficiais. No Argissolo Amarelo, a maior variação foi observada na pastagem, seguido por monocultivo de seringueira e mata. No Argissolo Acinzentado, os sistemas agroflorestais de seringueira-cacau e seringueira-açaí apresentaram menores valores para a relação C:P_o em todas as camadas do solo, e a maior variação foi observada na mata, seguido por monocultivo de seringueira e pastagem.

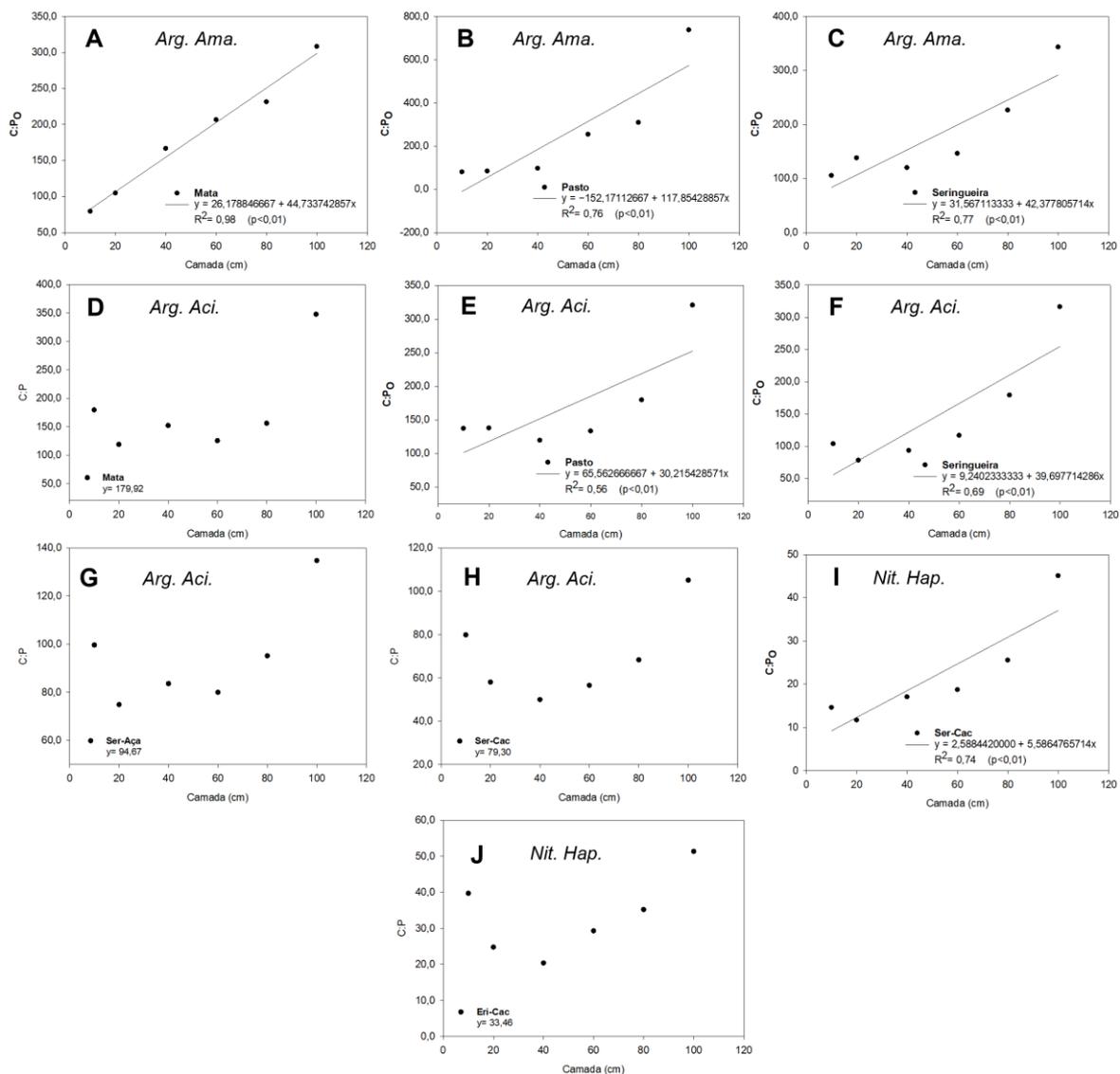


Figura 6. Distribuição linear da relação C:P₀ no perfil do solo. Figuras (A), (B) e (C) correspondem aos sistemas mata, pastagem e monocultivo de seringueira no Argissolo Amarelo, respectivamente. As figuras (D), (E), (F), (G) e (H) correspondem aos sistemas mata, pastagem, monocultivo de seringueira, seringueira-açaí e seringueira-cacau no Argissolo Acinzentado, respectivamente. As figuras (I) e (J) correspondem aos sistemas seringueira-cacau e eritrina-cacau, no Nitossolo Háplico, respectivamente.

A relação C:P₀ no Argissolo Amarelo apresentou distribuição linear significativa ($p < 0,01$) e com alto grau de explicação dos modelos ($R^2 > 0,50$) em todos os sistemas. No Argissolo Acinzentado, esta variável se ajustou ao modelo linear de distribuição apenas no pasto e monocultivo de seringueira, assim como no Nitossolo Háplico, apenas no sistema seringueira-cacau houve ajuste significativo ao modelo linear (Figura 6 E, F, I). Na comparação de médias entre sistemas de uso do Argissolo Amarelo, observou-se que não houve diferença significativa entre eles na camada de 0-10 cm (Figura 5 D). Na camada de 10-20 cm apenas pastagem e monocultivo de seringueira diferiram entre si, assim como na camada de 20-40 cm mata e pastagem diferiram entre si e não diferiram de monocultivo de seringueira pelo teste Tukey a 5% (Figura 5 D). Na camada de 40-60 cm, mata e pastagem não diferiram entre si, mas diferiram do monocultivo de seringueira; e nas camadas de 60-80 e 80-100 cm, apenas a pastagem diferiu significativamente dos demais sistemas (Figura 5 D). No Argissolo Acinzentado, a mata e a pastagem não diferiram entre si em nenhuma camada e o monocultivo de seringueira diferiu desses sistemas apenas na camada de 10-20 cm (Figura 5 E). Os SAFs seringueira-açaí e seringueira-cacau diferiram entre si apenas nas camadas 20-40 e 60-80 cm e o SAF ser-cacau diferiu de todos os outros sistemas na mesma camada. Nas camadas de 60-80 e 80-100 cm, os SAFs diferiram dos demais sistemas que, por sua vez, não diferiram entre si. No Nitossolo Háplico não houve diferença significativa entre os SAFs, apenas nas camadas de 20-40 e 80-100 cm (Figura 5 F).

A relação N:P₀ nos Argissolos apresentou comportamento crescente no perfil do solo, com os valores aumentando à medida que aumenta a profundidade das camadas. Os maiores valores e variações entre camadas de N:P₀ em cada classe de solo foram observados na pastagem, monocultivo de seringueira e SAF eritrina-cacau, no Argissolo Amarelo, Argissolo Acinzentado e Nitossolo Háplico, respectivamente. Os menores valores, dentre todos os sistemas e classes de solos, foram observados nos SAFs seringueira-cacau e eritrina-cacau no Nitossolo Háplico, e os maiores, no Argissolo Amarelo a partir da camada de 40-60 cm. Dentre os SAFs, o sistema com seringueira e cacau tiveram menores valores da relação N:P₀ tanto no Argissolo Acinzentado como no Nitossolo Háplico.

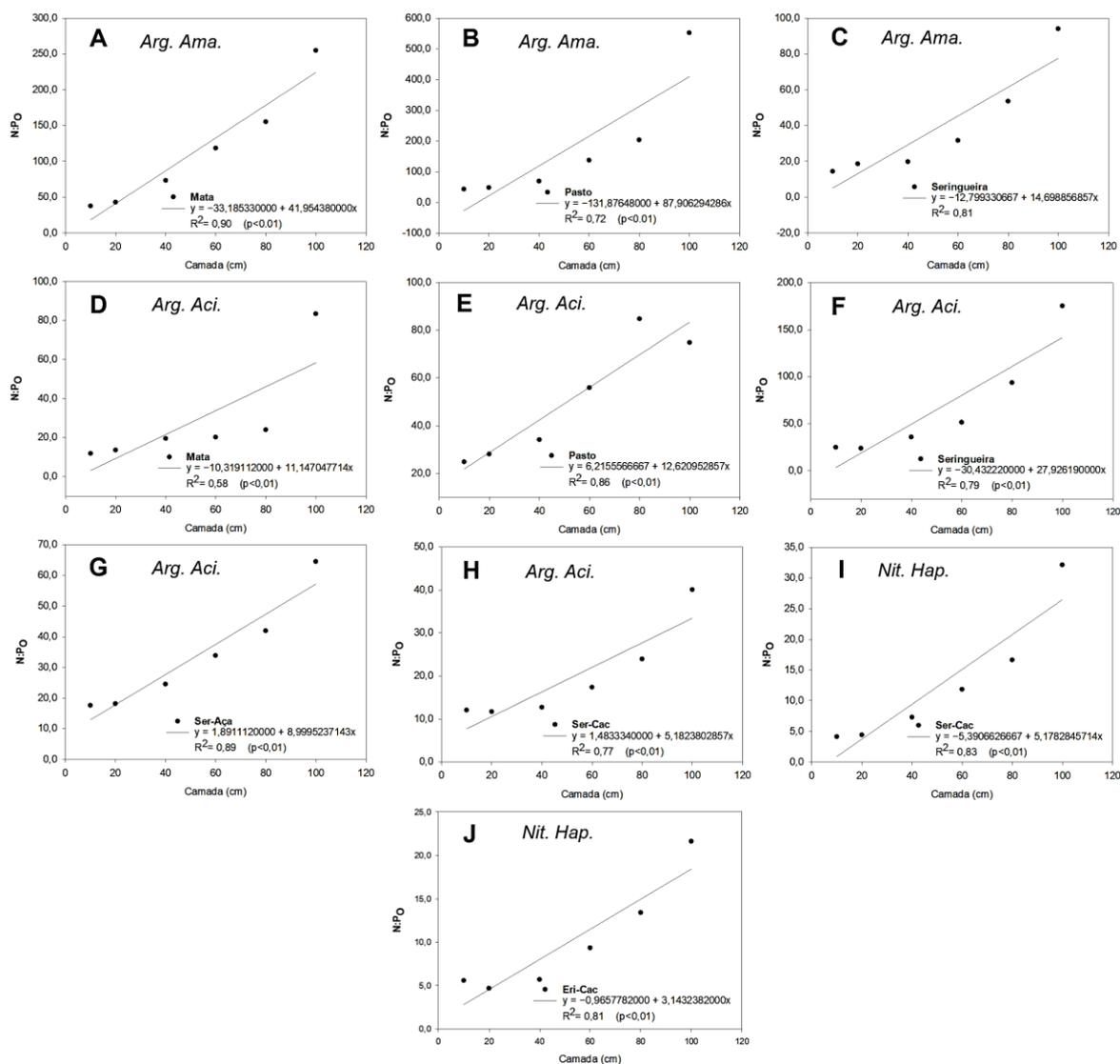


Figura 7. Distribuição linear da relação N:P₀ no perfil do solo. Figuras (A), (B) e (C) correspondem aos sistemas mata, pastagem e monocultivo de seringueira no Argissolo Amarelo, respectivamente. As figuras (D), (E), (F), (G) e (H) correspondem aos sistemas mata, pastagem, monocultivo de seringueira, seringueira-açaí e seringueira-cacau no Argissolo Acinzentado, respectivamente. As figuras (I) e (J) correspondem aos sistemas seringueira-cacau e eritrina-cacau, no Nitossolo Háplico, respectivamente.

Todos os sistemas apresentaram distribuição linear significativa ($p < 0,01$) com alto grau de explicação do modelo ($R^2 > 0,50$) (Figura 7). No Argissolo Amarelo, a mata e a pastagem não diferiram entre si a 5% e ambas diferiram do monocultivo de seringueira nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, pelo teste Tukey. Nas camadas 40-60, 60-80 e 80-100, todos os sistemas diferiram entre si (Figura 5G). No Argissolo Acinzentado, o sistema de monocultivo de seringueira não diferiu da pastagem e ambas diferiram dos demais sistemas nas camadas de 0-10, 20-40, 40-60 e 60-80 cm. Os SAFs seringueira-açaí e seringueira-cacau diferiram entre si em todas as camadas e o primeiro não diferiu da mata em todas as camadas, com exceção das camadas 20-40 e 80-100, onde houve diferença (Figura 5 H). No Nitossolo Háplico, os sistemas não diferiram entre si até a camada 20-40 cm e a partir da camada de 40-60 cm houve diferença significativa (Figura 5 I).

A relação C:N:P_o no Argissolo Amarelo variou entre 240:114:1 e 2357:1948:1 no perfil do solo na mata, entre 243:132:1 e 5015:3758:1 na pastagem e entre 299:41:1 e 1764:483:1 no monocultivo de seringueira. No Argissolo Acinzentado a variação foi entre 284:29:1 e 2197:446:1 na mata, entre 359:65:1 e 1801:326:1 na pastagem e entre 226:68:1 e 1809:1001:1 no monocultivo de seringueira. Nos SAFs seringueira-açaí e seringueira-cacau, na mesma classe de solo, a variação foi entre 202:49:1 e 841:402:1; e 162:33:1 e 686:286:1, respectivamente (Tabela 4). As variações da C:N:P_o no Nitossolo Háplico foram entre 103:39:01 e 317:226:01 no sistema seringueira-cacau e entre 187:52:01 e 580:244:01 no sistema eritrina-cacau.

Tabela 4. Relação C:N:P_o média para as camadas 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 de solos das classes Argissolo Amarelo, Argissolo Acinzentado e Nitossolo Háplico sob diferentes sistemas de uso no Sul da Bahia, Brasil.

Sistemas	Relação C:N:P _o					
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
1	240:114:1	314:129:1	685:300:1	1012:580:1	1664:1116:1	2357:1948:1
2	243:132:1	301:174:1	442:318:1	1604:866:1	1543:1016:1	5015:3758:1
3	299:41:01	530:72:1	421:69:1	617:133:1	732:172:1	1764:483:1
4	470:35:1	284:29:1	478:52:1	584:61:1	957:137:1	2197:446:1
5	359:65:1	364:74:1	445:127:1	578:243:1	645:304:1	1801:326:1
6	276:65:1	226:68:1	349:133:1	489:214:1	1241:645:1	1809:1001:1
7	247:44:1	202:49:1	268:79:1	326:114:1	453:200:1	841:402:1
8	204:31:1	162:33:1	173:44:1	216:66:1	308:108:1	686:286:1
9	113:32:1	103:39:1	161:69:1	199:110:1	234:133:1	317:226:1
10	319:45:1	219:41:1	187:52:1	296:94:1	408:155:1	580:244:1

Sistemas: Mata (1), Pastagem (2), Monocultivo de Seringueira (3), Mata (4), Pastagem (5), Monocultivo de Seringueira (6), Seringueira-Açaí (7), Seringueira-Cacau (8), Seringueira-Cacau (9), Eritrina-Cacau (10). Os sistemas de 1 a 3 estão dispostos sob Argissolo Amarelo; de 4 a 8 sob Argissolo Acinzentado e de 9 a 10 sob Nitossolo Háplico.

DISCUSSÃO

De modo geral, a relação C:N apresentou variações relativamente pequenas com o aumento da profundidade das camadas de solo, fato que pode estar relacionado à interrelação entre os dois elementos, fazendo com que a regulação de seus teores seja diretamente proporcionais no solo. Diferentemente da relação C:N, as razões C:P₀ e N:P₀ variaram de forma crescente à medida que a profundidade das camadas de solos aumentou, mostrando que os teores de P₀ em profundidade são muito inferiores aos de C e N, levando ao aumento das proporções entre os elementos.

O agrupamento dos SAFs seringueira-açaí e seringueira-cacau no Argissolo Acinzentado, e seringueira-cacau e eritrina-cacau no Nitossolo Háplico, no mesmo lado do CP1, mostrou que esses sistemas se comportam de forma parecida com relação aos teores de C, N e P₀ e às razões entre eles, diferenciando-se dos monocultivos de pastagem e seringueira e da mata. Isso sugere que a composição dos sistemas de uso do solo interfere nos teores dos elementos e na estequiometria destes no solo.

Comportamento da relação C:N do solo

A relação C:N em todos os sistemas e classes de solos foi inferior à relação C:P₀ e N:P₀, estando de acordo com o encontrado por Zhou et al. (2018), tendo como principal razão para isso o baixo teor de P dos solos tropicais. Hui et al. (2021), estudando as variações da estequiometria C:N:P no perfil do solo de florestas tropicais na China, também observaram que as concentrações de C e N e as razões C:P e N:P do solo foram maiores do que a concentração de P e a relação C:N em todo o solo, à medida que houve incremento na profundidade.

Tian et al. (2010) encontraram razão C:N média igual a 12 para perfis de solos da China, a uma profundidade de 250 cm. No presente estudo, no perfil de 100 cm, a variação média global da relação C:N foi entre 1,61 na mata sobre Argissolo Amarelo e 11,42 na mata sobre Argissolo Acinzentado, sendo observada

uma maior ocorrência de valores abaixo de 5. O sistema de mata no Argissolo Acinzentado foi quem mais se aproximou da média encontrada (Tian et al., 2010) para a camada de 250 cm do solo.

A relação C:N variou de forma oposta entre as classes de solos, sendo observados no Argissolo Amarelo os menores valores e no Argissolo Acinzentado os maiores valores. Esse comportamento pode estar relacionado às características físicas e estruturais do solo que possibilita um maior acúmulo e preservação de matéria orgânica no Argissolo Acinzentado, nas camadas superiores. A influência do tipo de solo e das práticas de manejo sobre a relação C:N no perfil a 1 m de profundidade também foram observadas por Hui et al. (2021). Para estes sistemas, a profundidade só influenciou a relação C:N significativamente nas camadas intermediárias nos Argissolos (20-40, 40-60 e 60-80). Estudos de Wang et al. (2014), Zhou et al. (2018) e Zinn et al. (2018) não observaram influência da profundidade de camadas de solos e diferentes sistemas de uso sobre a relação C:N do solo, divergindo dos resultados encontrados neste estudo.

Os sistemas florestais em monocultura e agroflorestais nas diferentes classes de solos obtiveram maiores valores para a relação C:N nas primeiras camadas do solo, até a profundidade de 40 cm, sendo notada uma leve tendência de decréscimo com o incremento da profundidade. Isso pode estar relacionado ao fato de que nos sistemas florestais há um maior aporte de serrapilheira e raízes nas camadas superiores que elevam o teor de C e a razão C:N (Liu et al., 2010; Gama-Rodrigues et al., 2010; Murthy et al., 2013; Zhou et al., 2017b, Deng et al., 2018). Além disso, a MO presente nas camadas mais profundas do solo tem maior tempo de armazenamento e grau de composição, devido ao maior tempo de exposição à decomposição microbiana, reduzindo o teor de C e a relação C:N do solo (Boutton et al., 1998; Zhou et al., 2018; Xie et al., 2016; Sun et al., 2019).

Em comparação com sistemas constituídos por gramíneas, a composição da serrapilheira dos sistemas arbóreos dispõe em maior quantidade de materiais bioquimicamente mais recalcitrantes (particularmente biopolímeros alifáticos), que são menos adequados como substratos para os microrganismos, reduzindo dessa forma a taxa de decomposição da matéria orgânica e a perda de C, aumentando a razão C:N do solo (Liao et al., 2006; Filley et al., 2008).

Os maiores valores da relação C:N nas primeiras camadas de solo, nos sistemas florestais, podem estar relacionados também à maior eficiência de uso

microbiano dos elementos N e P em comparação com a eficiência de uso do C pelos microrganismos, reduzindo os teores de N e P do solo, mantendo estável o teor de C (Mooshammer et al., 2014; Zhang et al., 2019). Associado a isso, uma maior absorção de N e P pelas plantas do sistema favorecem um maior acúmulo de C em comparação aos demais elementos nessas camadas do solo (Liu e Wang, 2020).

A pastagem nos Argissolos Amarelo e Acinzentado teve tendência de decréscimo da relação C:N com o incremento da profundidade, sendo que no Argissolo Acinzentado houve um aumento significativo na camada de 80-100 cm. A razão para essa ocorrência se deve à diminuição do volume de raízes da *Brachiaria* nas camadas mais profundas, que apesar de terem um sistema radicular profundo e vigoroso (Sávio et al., 2011), podendo chegar a 2 m de profundidade (Seiffert, 1980), o volume de raízes no subsolo é bem menor em comparação com as camadas superficiais do solo.

A pouca variação na relação C:N no perfil solo em todos os sistemas de uso da terra mostra que a relação C:N é pouco afetada ou não é afetada pela mudança no sistema de uso, sendo equivalente aos resultados encontrados nos estudos de Wang et al. (2014), Deng e Shangguan (2017) e Zinn et al. (2018). A provável razão para a estabilidade na relação C:N no perfil do solo é devido às mudanças em C_{OT} e N_T ocorrerem de forma simultânea, acopladas e proporcionais no perfil do solo, ou seja, as concentrações desses elementos aumentam e diminuem na mesma proporção no perfil do solo não alterando a razão C:N (Zinn et al., 2018).

Comportamento da relação C:P_o e N:P_o do solo

Os altos valores observados nas relações C:P_o e N:P_o no perfil dos solos, em comparação com os valores da relação C:N, se devem ao fato de que neste estudo foram adotadas as concentrações da fração orgânica de P para a determinação das razões estequiométricas, que representam apenas uma porção do P total do solo. Diferentemente do C e do N, que apresentam frações orgânicas e total aproximadamente equivalentes, o P_o é significativamente menor que o P total, tendo em vista que o P solo, em sua maioria, é oriundo de reservas minerais,

elevando dessa forma as razões C:P_o e N:P_o. Frossard et al. (2016) também observaram proporções C:P_o mais altas em solos intemperizados em comparação com as razões C:P total, fato atribuído à baixa concentração de P_o no solo.

A relação C:P_o foi maior que a relação C:N em todos os sistemas e classes de solos, e os maiores valores foram observados na última camada do solo (80-100 cm), sendo as menores relações C:P_o observadas nos SAFs do Argissolo Acinzentado e Nitossolo Háplico. Nos trabalhos de Bui e Henderson (2013) e Wang et al. (2014) também foi observada forte dependência das razões C:P e N:P às alterações no uso da terra em comparação à relação C:N que se mostra pouco responsiva devido à interrelação entre o C e o N que se altera de forma equivalente no solo.

A pastagem no Argissolo Amarelo se destacou com os maiores valores para relação C:P_o dentre todos os sistemas na camada de 80 a 100 cm do solo, e os demais sistemas apresentaram menor variação no perfil do solo. Isso indica que nessa camada do solo sob pastagem, há um baixo teor de P_o e um alto teor de C aumentando a razão C:P do solo. Nesse sentido, Ladd et al. (2013) explicam que as relações C:P e C:N altas são, frequentemente, relacionadas ao alto teor de C nos solos dos ecossistemas tropicais.

Os valores baixos de C:P_o nas camadas superiores do solo em relação às camadas mais profundas é um indicativo da entrada de P_o pela MOS, podendo não haver limitação desse nutriente para as plantas devido à mineralização do elemento. De acordo com Ma et al. (2020) e Tian et al. (2010), a relação C:P do solo é considerada um marcador da mineralização de P, quando baixa favorece a liberação de nutrientes através da decomposição microbiana da MO promovendo um aumento de P efetivo no solo, e quando alta apresenta efeito inverso, levando à limitação do P mineralizado no solo que, segundo Wang et al. (2014), se deve à competição dos microrganismos com as plantas pelo P inorgânico do solo, afetando o crescimento das plantas.

A relação C:P é um marcador de mineralização de P, considerando que apenas em valores abaixo de 100 da razão C:P o P não será limitado para as plantas (Cândido, 2011) e que nos solos tropicais são, em grande parte, oriundo da MO. Além disso, a limitação de P no solo pode estar ocorrendo nas camadas mais profundas, onde foram observados os maiores valores da relação C:P_o,

principalmente nos sistemas sob os Argissolos Acinzentado e Amarelo, onde em todas as camadas a relação C:P_o foi relativamente elevada.

No Nitossolo Háplico a relação C:P_o foi relativamente baixa em todas as camadas e em todos os sistemas, no entanto, ainda assim apresentaram valores superiores a 100. A principal razão para esse efeito no Nitossolo Háplico é o fato de se tratarem de sistemas agroflorestais, com espécies de grande porte e capazes de aportar grande quantidade de serrapilheira, além de terem sistemas radiculares muito profundos capazes de acessar e extrair o P e outros elementos presentes em camadas subsuperficiais, inacessíveis às outras espécies e exportá-lo para a superfície do solo através dos órgãos senescentes em decomposição (Blaser et al., 2014; Zhou et al., 2017b; Zhou et al., 2018).

Os baixos valores da relação C:P_o no sistema Eritrina-Cacau podem estar relacionados ao fato da *Erythrina glauca* ser uma leguminosa do gênero eritrina que, por sua vez, tem grande potencial de associação com uma ampla variedade de rizóbios (Radomski e Oliveira, 2018), portanto, tem potencial de fixação de N atmosférico. Estudos de Blaser et al. (2014) e Png et al. (2017) mostraram que, em solos sob plantas fixadoras de N₂, no geral, tem maior atividade de enzimas fosfatases, o que para Kantola (2012) favorece a mineralização do P orgânico em formas disponíveis para as plantas. Além disso, segundo Richardson et al. (2009), a atividade da fosfatase em ambiente extracelular é induzida sob condições de deficiência de P, sendo liberada pelas raízes na região da rizosfera, auxiliando na conversão de P para formas prontamente disponíveis, favorecendo um acúmulo de P nas plantas e o retorno na forma orgânica pelo material vegetal depositado sobre o solo.

Os menores valores da relação C:P_o no Nitossolo Háplico e nas primeiras camadas dos Argissolos podem ainda estar relacionados ao fato de se tratar de solos tropicais e minerais, com altos teores de argila e elevada acidez e concentração de sesquióxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) (principalmente os Argissolos) o que viabiliza o processo de adsorção (Pavinato et al., 2010). Isso ocorre, devido ao P_i e muitos compostos de P_o serem mais eficientes na concorrência por sítios de adsorção em comparação com os compostos orgânicos não fosforilados (Fransson e Jones, 2007; Schneider et al., 2010). Dessa forma, considerando que a adsorção protege os compostos orgânicos da decomposição e dificulta a ação enzimática, a sorção do P_o favorece a persistência dos compostos

de P_o por mais tempo no solo em comparação com compostos não fosforilados, levando a razões C: P_o mais baixas (Schmidt et al., 2011; Spohn, 2020a).

Estudos realizados por Spohn (2020b), Yang et al. (2019) e Chavarro-Bermeo et al. (2022), mostraram que o armazenamento de C em solos minerais ocasiona, concomitantemente, o sequestro de grande quantidade de P_o , pelo fato de a MO desses solos ser rica em P, devido à incorporação pelos microrganismos para a mineralização do C_o , liberando a partir desse processo, grande quantidade de necromassa microbiana rica em P no solo, que contribui para a redução da relação C: P_o . Nesse contexto, os sistemas florestais e agroflorestais aportam e armazenam grande quantidade de C no solo (Müller e Gama-Rodrigues, 2012; Monroe et al., 2016; Vicente et al., 2016), e tal fato pode contribuir para a redução da razão C: P_o , uma vez que estão estocando P oriundo do processo de mineralização do C, principalmente nas camadas superiores onde a atividade microbiana é maior.

Hui et al. (2021) reiteram que para a relação C:P do solo, uma relação alta, maior que 300, indica a imobilização líquida de nutriente. Considerando a importância do P_o para a manutenção dos ecossistemas sobre solos tropicais (Gama-Rodrigues et al., 2014; Turner e Engelbrecht, 2011) e o parâmetro descrito pelos autores, analisa-se que no Argissolo Amarelo pode estar havendo restrição de P na pastagem a partir da camada de 60 a 80 cm e na mata e monocultivo de seringueira na camada de 80 a 100 cm, uma vez que obtiveram valores da relação C:P superiores a 300. A mesma consideração se faz para mata, pastagem e monocultivo de seringueira na camada de 80 a 100 cm no Argissolo Acinzentado. No Nitossolo Háptico todos os valores foram muito inferiores a 300.

Da mesma forma que a relação C: P_o , a relação N: P_o apresentou valores maiores que a relação C:N no perfil do solo, sendo observada a maior variação no sistema de pastagem no Argissolo Amarelo. Com exceção dos sistemas monocultivo de seringueira no Argissolo Amarelo e mata, e seringueira-cacau no Argissolo Acinzentado que se mantiveram estáveis até a camada de 60 a 80 cm, os demais sistemas apresentaram leve tendência de crescimento com o aumento da profundidade do solo, dessa forma se equiparando à relação C: P_o .

Estudos de Tian et al. (2010), Bing et al. (2016) e Zhou et al. (2018) apresentaram valores decrescentes para a relação N:P e C:P, com o aumento da profundidade do solo. Os teores de N no perfil dos solos, em todos os sistemas

estudados, foram muito superiores aos de P_0 , o que leva aos altos valores da relação $N:P_0$ nas camadas do solo, divergindo dos resultados encontrados pelos autores para a relação $N:P$. Além disso, no estudo de Zhou et al. (2018), os solos sob espécies lenhosas, em comparação com as áreas de pastagem, apresentaram maiores valores para as relações $N:P$ e $C:P$ nas camadas superficiais do solo, sendo revertido a partir da camada de 5 cm.

Dados sobre o comportamento da relação $N:P_0$ no perfil do solo são escassos, uma vez que esta é uma relação ainda pouco estudada. No entanto, considerando que a fração de P_0 diminui muito com o aumento da profundidade em solos tropicais, pode haver naturalmente um aumento nas razões $N:P_0$ no perfil do solo, uma vez que o teor de N pode permanecer estável, mas o P_0 reduz muito no sentido superfície-subsuperfície.

A relação $N:P$ é muito importante para a fertilidade do solo, pois ela pode determinar a limitação de nutrientes no solo. Segundo Vitousek e Farrington, (1997) o N é o principal fator que afeta a fertilidade do solo quando a relação $C:N$ é menor que 30 e a relação $N:P$ é menor que 14. De modo geral, quando a relação $C:N$ é alta e a relação $N:P$ é baixa, isto representa uma condição de limitação de N (Huang et al., 2018). Com relação à razão $N:P_0$, Yang e Post (2011) observaram valores elevados em solos intemperizados e que, nesta condição, pode levar à completa mineralização do P_0 do solo, contrapondo à mineralização do C e N que são estabilizados simultaneamente. Isso se deve ao desacoplamento do P ao C e N, fazendo com que a sua mineralização ocorra com o auxílio de ações bioquímicas enzimáticas, quando em condições de baixo suprimento de P no solo, não sendo dependente da mineralização biológica como o C e o N (McGill e Cole, 1981; Yang e Post, 2011).

Neste estudo, a relação $C:N$ foi menor que 30 em todos os sistemas estudados e a relação $N:P_0$ foi superior a 14 em todas as camadas de todos os sistemas do Argissolo Amarelo e na pastagem, monocultivo de seringueira e SAF seringueira-açaí no Argissolo Acinzentado. Já nas camadas até 20 cm da mata e até 40 cm do SAF seringueira-cacau no Argissolo Acinzentado e até 60 cm nos SAFs eritrina-cacau e seringueira-cacau no Nitossolo Háplico, a relação $N:P_0$ foi inferior a 14. Portanto, de acordo com o parâmetro descrito pelos autores, pode-se considerar que o N não foi o fator que mais afetou a fertilidade do solo e a disponibilidade de nutrientes em nenhum sistema do Argissolo Amarelo e na

pastagem, monocultivo de seringueira e SAF seringueira açai no Argissolo Acinzentado. No Nitossolo Háplico, apenas nas camadas abaixo de 60 cm o N pode ter sido o fator limitante da disponibilidade de nutrientes.

De acordo com Huang et al. (2018), o conceito de estratégia de conservação de nutrientes determina que as altas habilidades de conservação de N das plantas devem ocorrer em condições de alta relação C:N e baixa relação N:P. Já as altas habilidades de conservação de P das plantas devem ocorrer em condições de altas relações C:P e N:P. Considerando tais conceitos e o fato de que neste estudo foram observadas relações C:P_o e N:P_o muito maiores que a relação C:N, sugerindo uma baixa disponibilidade de P no solo, pode-se considerar que esta condição favorece a conservação do P pelas plantas, a fim de manter a atividade metabólica nas condições de indisponibilidade do nutriente no solo.

Comportamento da relação C:N:P_o no solo

A relação C:N:P_o média do solo (0-100 cm) variou entre 145:64:1 no Nitossolo Háplico sob SAF de seringueira-cacau, onde foram encontradas as menores proporções de C:N:P_o e 511:316:1 no Argissolo Amarelo sob pastagem onde ocorreram as maiores proporções (Tabela 4), sendo superiores às razões encontradas por Tian et al. (2010) (60:05:01) e Bing et al. (2016) (154:7:1) para relação C:N:P. Isso se deve ao fato dos autores terem adotado dados de P total e, neste estudo, as razões foram calculadas pela fração de P_o do solo. Essa disparidade entre as proporções encontradas nas diferentes classes de solos se deve ao grande aporte e à diversificação da serrapilheira dos sistemas agroflorestais do Nitossolo Háplico. Com isso há a elevação do conteúdo de nutrientes como N e P, diminuindo as proporções elementares.

Dentre todos os sistemas, os SAFs sobre Nitossolo Háplico apresentaram as menores proporções médias para a profundidade de 100 cm, sendo observadas razões médias de 145:64:1 no sistema seringueira-cacau e de 227:61:1 no sistema eritrina-cacau. Tais proporções são muito superiores às encontradas por Tian et al. (2010) (60:5:1) em solos chineses, para camadas do solo até a profundidade de 250 cm, considerando a fração total de P. Os altos teores de C e N encontrados

nos solos e os baixos teores de P_o , proporcionaram razões C:N:P superiores às de Tian et al. (2010) neste estudo.

Para a camada superficial de 0-10 cm, é considerada como parâmetro em muitos estudos a relação C:N:P global do solo de 186:13:1, obtida em estudo de Cleveland e Liptizin (2007). Neste estudo, a relação C:N: P_o do solo na camada de 0-10 cm em todos os sistemas e classes de solos foram superiores às proporções globais descritas pelos autores e às proporções para solos da China descritas por Tian et al. (2010) (134:9:1), com exceção do sistema seringueira-cacau no Nitossolo Háplico que apresentou razão C:N: P_o de 113:32:1, portanto, inferior às citadas acima. O SAF seringueira-cacau, nessa classe de solo, apresentou maiores concentrações de N e P_o , o que justifica valores baixos para a razão C:N: P_o e inferiores a C:N:P global e Chinesa. Vale ressaltar que Cleveland e Liptizin (2007) e Tian et al. (2010) usaram dados de P_T disponíveis na literatura e os diferentes métodos de determinação do P têm sido um problema nos estudos da estequiometria do solo, uma vez que pode subestimar ou superestimar as concentrações do elemento, influenciando as razões elementares.

A relação C:N: P_o foi maior no Argissolo Amarelo sob pastagem em todas as camadas a partir da camada de 40-60 cm, superando todos os demais sistemas e classes de solos, porém, até a profundidade de 40 cm, esse sistema foi superado pela mata e seringueira no Argissolo Amarelo, mata e pastagem no Argissolo Acinzentado.

Os sistemas agroflorestais apresentaram razões C:N: P_o mais baixas, principalmente nas camadas superiores do solo, isso pode estar relacionado à maior liberação de nutrientes mineralizados no solo desses sistemas e à perda de C consumido no processo de mineralização da MO em condições tropicais, levando às razões C:N:P mais baixas (Fanin et al., 2017; Hui et al., 2021). Além disso, a região do estudo apresenta alta pluviometria média anual (~2000 mm), o que pode influenciar na disponibilidade de nutrientes, devido à perda de N por lixiviação e à oclusão de P (Hui et al., 2021), fato observado por Neufeldt et al. (2000) e Zhang et al. (2005), que afirmam haver lixiviação e oclusão de grande parte do P dos solos altamente intemperizados nas condições de altas precipitações e temperaturas das regiões tropicais.

De modo geral, a relação C:N: P_o foi maior nas classes dos Argissolos, principalmente no Argissolo Amarelo, caracterizado por ter baixa fertilidade,

elevada acidez e baixa deposição de matéria orgânica, sendo destacado a presença de monocultivos, principalmente de pastagem. Por outro lado, o Nitossolo com SAFs apresentou os menores valores para a relação C:N:P_o, o que se deve à alta deposição de matéria orgânica com teor de P e N mais elevados reduzindo as razões entre os elementos.

Estequiometria entre classes de solos e sistemas de uso

A estequiometria de C, N e P entre as classes de solos apresentaram comportamento parecido, com pequena variação na relação C:N, decrescendo com aumento da profundidade das camadas de solos e valores muito superiores das razões C:P_o e N:P_o, com leve tendência de acréscimo no perfil do solo com o aumento da profundidade. A relação C:N variou de forma semelhante entre as classes de solos.

Apesar desse comportamento, o Nitossolo Háplico apresentou os menores valores e menor variação para as razões C:P_o (103,75 a 649,04) e N:P (31,58 a 273,88), mostrando que os sistemas sobre esse solo são mais eficientes na acumulação de P (Figura 6), seja pela extração em profundidade e deposição pela serrapilheira ou por exsudatos radiculares e estímulo à ação enzimas fosfatases, no caso das fixadoras de N₂ atmosférico, como sugerido por Kantola (2012), Blaser et al. (2014) e Png et al. (2017). Além disso, os Nitossolos são caracterizados por terem boa fertilidade, baixos níveis de acidez e elevada saturação por bases, o que diminui a adsorção do P à superfície de outros minerais (Antonello et al., 2002). Dentre os Argissolos, o Argissolo Amarelo obteve maiores valores para as relações C:P_o e N:P_o, o que pode estar relacionado com as diferentes características dos tipos de solos. Os Argissolos Acinzentados apresentam condição de restrição de drenagem que pode acelerar a atividade microbiana, a decomposição, levando com isso, a maior perda de C do solo (Brady e Weill, 2013), além de viabilizar a perda de N por lixiviação do nitrato no perfil do solo (Vieira, 2017), fatores que contribuem para a menor relação C:P_o e N:P_o no solo.

Com relação aos sistemas de uso da terra, à mata e ao monocultivo de seringueira, estes se destacaram no Argissolo e Acinzentado, assim como a

pastagem no Argissolo Amarelo. Já no Nitossolo, o sistema eritrina-cacau foi quem apresentou maiores valores entre camadas para as razões C:P₀ e N:P₀. O comportamento da relação C:N reflete o maior teor de C nos sistemas florestais em relação à pastagem, apesar de não haver grande influência dos sistemas de uso sobre esta variável.

RESUMO E CONCLUSÕES

- A relação C:N apresentou pouca variação no perfil do solo em todos os sistemas e classes de solos, sugerindo ser pouco responsiva à alteração no sistema de uso.
- As relações C:P₀ e N:P₀ sofreram influências do sistema de uso, apresentando maiores variações que C:N no perfil do solo, sendo maiores em monocultivos e menores nos sistemas consorciados.
- As relações C:P₀ e N:P₀ aumentaram com o incremento da profundidade, apresentando maiores valores nas camadas abaixo de 40 cm. Os sistemas florestais e agroflorestais nos Argissolos tiveram menores razões C:P₀ e N:P₀ ou não diferiram estatisticamente da pastagem. Assim como no Nitossolo, ambos os sistemas tiveram menores razões C:P₀ em comparação com os demais sistemas e classes de solos, mostrando um maior conteúdo de P nesses sistemas.
- Todos os sistemas nos Argissolos Amarelo e Acinzentado apresentaram restrição de P nas camadas subsuperficiais, abaixo de 60 cm, uma vez que apresentaram relação C:P maior que 300.
- O sistema mata e seringueira-cacau até 40 cm no Argissolo Amarelo, e eritrina-cacau e seringueira-cacau até 60 cm no Nitossolo Háplico, podem estar sob limitação de N, uma vez que a relação C:N foi inferior a 30, e a N:P foi inferior a 14.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrão, S.F., Rosa, S.F., Reinert, D.J., Reichert, J.M., Secco, D., Ebling, Â.A. (2015) Alterações químicas de um Cambissolo Húmico causadas por florestamento com *Pinus taeda* em área de campo natural. *Floresta*, 45:455-464.
- Agevi, H., Onwonga, R., Kuyah, S., Tsingalia, M. (2017) Carbon stocks and stock changes in agroforestry practices: a review. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20 :101-109.
- Ågren, G.I. (2008) Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 39:153-170.
- Aleixo, S., Gama-Rodrigues, A.C., Costa, M.G., Sales, M.V.S., Gama-Rodrigues, E.F., Marques, J.R.B. (2017) P transformations in cacao agroforests soils in the Atlantic Forest region of Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, 91:423-437.
- Aleixo, S., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Schripsema, J. (2019) Organic phosphorus of soils under cacao agroforests in the Atlantic coast of Brazil. *Geoderma Regional*, 17:e00220.
- Almeida, M.V.C., Souza, V.D., Costa, R.S.C., Vieira, A.H., Rodrigues, A.N.A., Costa, J.N.M. Junior, R.S.M. (1995) Sistemas agroflorestais como alternativa auto-sustentável para o Estado de Rondônia. 1. ed. Porto Velho: Planaflo, PNUD: Embrapa – CPAF - RO, 59p.
- Antonello, L.L., Wittern, K.P., Claessen, M.E.C., Bertolino, L.C. (2002) Mineralogia e química de algumas unidades de solos do Estado do Rio de Janeiro. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 21p.
- Apriyanto, E., Hidayat, F., Nugroho, P.A.A, Tarigan, I. (2021) Litterfall production and decomposition in three types of land use in Bengkulu Protection Forest. *Planta Tropika: Jurnal Agrosains*, 9:35-41.

- Armengot, L., Barbieri, P., Andres, C., Milz, J., Schneider, M. (2016) Cacao agroforestry systems have higher return on labor compared to full-sun monocultures. *Agronomy for Sustainable Development*, 36:1-10.
- Asigbaase, M., Dawoe, E., Sjogersten, S., Lomax, B.H. (2021) Decomposition and nutrient mineralisation of leaf litter in smallholder cocoa agroforests: a comparison of organic and conventional farms in Ghana. *Journal of soils and sediments*, 21:1010-1023.
- Bai, S.H., Gallart, M., Singh, K., Hannet, G., Komolong, B., Yinil, D., Field, D.J. Muqaddas, B., Wallace, H.M. (2022) Leaf litter species affects decomposition rate and nutrient release in a cocoa plantation. *Agriculture, Ecosystems e Environment*, 324:e107705.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., Somarriba, E. (1998) Shade management in coffee and cacao plantations. *In: Directions in Tropical Agroforestry Research: Adapted from selected papers presented to a symposium on Tropical Agroforestry organized in connection with the annual meetings of the American Society of Agronomy*. Indiana, USA: Springer Netherlands, p.139-164.
- Bergkemper, F., Welzl, G., Lang, F., Krüger, J., Schloter, M., Schulz, S. (2016) The importance of C, N and P as driver for bacterial community structure in German beech dominated forest soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 179:472–480.
- Bing, H., Wu, Y., Zhou, J., Sun, H., Luo, J., Wang, J., Yu, D. (2016) Stoichiometric variation of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil sand its implication for nutrient limitation in alpine ecosystem of Eastern Tibet an Plateau. *Journal of Soils and Sediments*, 16:405-416.
- Blaser, W.J., Oppong, J., Hart, S.P., Landolt, J., Yeboah, E., Six, J. (2018) Agricultura sustentável com clima inteligente em agroflorestas de sombra baixa a intermediária. *Nature Sustainability*, 1:234-239.

- Blaser, W.J., Shanungu, G.K., Edwards, P.J., Olde Venterink, H. (2014) Woody encroachment reduces nutrient limitation and promotes soil carbon sequestration. *Ecology and evolution*, 4:1423-1438.
- Bhagwat, S.A., Willis, K.J., Birks, H.J.B., e Whittaker, R.J. (2008) Agroforestry: a refuge for tropical biodiversity? *Trends in ecology e evolution*, 23:261-267.
- Bradford, M.A., Veen, G.F., Bonis, A., Bradford, E.M., Classen, A.T., Cornelissen, J.H.C., Crowther, T.W., Long, J.R., Freschet, G.T., Kardol, P., Manrubia-Freixa, M., Maynard, D.S., Newman, G.S., Logtestijn, R.S.P., Viketoft, M., Wardle, D.A., Wieder, W.R., Wood, S.A., Van der Putten, W.H. (2017) A test of the hierarchical model of litter decomposition. *Natureza Ecologia e Evolução*, 1:1836–184.
- Boutton, T.W., Archer, S.R., Midwood, A.J., Zitzer, S.F., Bol, R. (1998) $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic carbon and their use in documenting vegetation change in a subtropical savanna ecosystem. *Geoderma*, 82:5-41.
- Bowman, R.A., Moir, J.O. (1993) Basic EDTA as an extractant for soil organic phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, 57:1516-1518.
- Box, G.E., Cox, D.R. (1964) An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 26:211-243.
- Brady, N.C., Weill, R. (2013) *Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 716p.
- Brandani, C.B., Santos, D.D. (2009) Transformações do carbono no solo. *In*: Cardoso, E.J.B.N., Andreote, F.D. *Microbiologia do solo*. 2. ed. Piracicaba: ESALQ, 81-94p.
- Bui, E.N., Henderson, B.L. (2013) C: N: P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. *Plant and soil*, 373:553-568.

- Cabrera, M.L., Kissel, D.E., Vigil, M.F (2005) Nitrogen mineralization from organic residues: research opportunities. *Journal of environmental quality*, 34: 75-79.
- Campbell, C.A., Zentner, R.P., Selles, F., Biederbeck, V.O., McConkey, B.G., Blomert, B., Jefferson, P.G. (2000) Quantifying short-term effects of crop rotations on soil organic carbon in southwestern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 80:193-202.
- Cândido, C.S. (2011) Dinâmica do fósforo em diferentes sistemas de manejo do solo. Doutorado em Agroecologia. Universidade Estadual do Maranhão -UEMA, São Luiz -MA, 43p.
- Canellas, L.P., Velloso, A.C.X., Marciano, C.R., Ramalho, J.F.G.P., Rumjanek, V.M., Rezende, C.E., Santos, G.D.A. (2003) Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27:935-944.
- Cantarella, H. (2007) Nitrogênio. *In*: Novais, R.F., Alvarezv., V.H., Barros, N.F., Fontes, R.L.F., Cantarutti, R.B., Neves, J.C.L. Fertilidade do solo. 2. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.376-449.
- Carvalho, D.C.D., Pereira, M.G., Guareschi, R.F., Simon, C.A., Toledo, L.D.O., Piccolo, M.D.C. (2017) Carbono, nitrogênio e abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ do solo em coberturas florestais. *Floresta e Ambiente*, 24:01-10.
- Chavarro-Bermeo, J.P., Arruda, B., Mora-Motta, D.A., Bejarano-Herrera, W., Ortiz-Morea, F.A., Somenahally, A., Silva-Olaya, A.M. (2022) Responses of Soil Phosphorus Fractions to Land-Use Change in Colombian Amazon. *Sustainability*, 14:1-14.
- Chen, J., Seven, J., Zilla, T., Dippold, M.A., Blagodatskaya, E., Kuzyakov, Y. (2019) Microbial C: N: P stoichiometry and turnover depend on nutrients availability in soil: A ^{14}C , ^{15}N and ^{33}P triple labelling study. *Soil Biology and Biochemistry*, 131:206-216.

- Chen, L., Li, P., Yang, Y. (2016) Dynamic patterns of nitrogen: Phosphorus ratios in forest soils of China under changing environment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121:2410-2421.
- Clara, L., Fatma, R., Viridiana, A., Liesl, W. (2017) Soil organic carbon: the hidden potential. 1. ed. Roma: Food and Agriculture Organisation (FAO), 77p.
- Cleveland, C.C., Liptzin, D. (2007) C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 85:235-252.
- Coleman, M.D., Isebrands, J.G., Tolsted, D.N., Tolbert, V.R. (2004) Comparing soil carbon of short rotation poplar plantations with agricultural crops and woodlots in North Central United States. *Environmental Management*, 33:S299-S308.
- Conte, E., Anghinoni, I., Rheinheimer, D.D.S. (2002) Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26:925-930.
- Costa, J.B (2004) *Caracterização e Constituição do Solo*. 7. ed. Lisboa: Fundação Calouste, 527p.
- Costa, M.G., Gama-Rodrigues, A.C., Gonçalves, J.L.D.M., Gama-Rodrigues, E.F., Sales, M.V.D.S., Aleixo, S. (2016) Labile and non-labile fractions of phosphorus and its transformations in soil under eucalyptus plantations, Brazil. *Forests*, 7:15.
- Cotrufo, M.F., Soong, J.L., Horton, A.J., Campbell, E.E., Haddix, M.L., Wall, D.H., Parton, W.J. (2015) Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience*, 8:776-779.
- Coutinho, R.P., Urquiaga, S., Boddey, R.M., Alves, B.J.R., Torres, A.Q.A., Jantalia, C.P. (2010) Estoque de carbono e nitrogênio e emissão de N₂O em diferentes usos do solo na Mata Atlântica. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 45:195-203.

- Cunha, G.D.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.
- Dawoe, E.K., Isaac, M.E., Quashie-Sam, J. (2010) Litterfall and litter nutrient dynamics under cocoa ecosystems in lowland humid Ghana. *Plant and soil*, 330:55-64.
- Deng, L., Shangguan, Z.P. (2017) Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China. *Land Degradation & Development*, 28:151-165.
- Deng, L., Wang, K., Zhu, G., Liu, Y., Chen, L., Shangguan, Z. (2018) Changes of soil carbon in five land use stages following 10 years of vegetation succession on the Loess Plateau, China. *Catena*, 171:185-192.
- Deng, Q., Hui, D., Luo, Y., Elser, J., Wang, Y.P., Loladze, I., Zhang, Q., Dennis, S. (2015) Down-regulation of tissue N:P ratios in terrestrial plants by elevated CO². *Ecology*, 96:3354-3362.
- Dhyan, S.K., Ram, A., Dev, I. (2016) Potential of agroforestry systems in carbon sequestration in India. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 86:1103-1112.
- Dick, W.A., Tabatabai, M.A. (1977) An alkaline oxidation method for determination of total phosphorus in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 41:511-514.
- Diochon, A., Kellman, L., Beltrami, H. (2009) Looking deeper: An investigation of soil carbon losses following harvesting from a managed northeastern red spruce (*Picea rubens* Sarg.) forest chronosequence. *Forest Ecology and Management*, 257:413-420.
- Ekblad, A., Nordgren, A. (2002) Is growth of soil microorganisms in boreal forests limited by carbon or nitrogen availability? *Plant and Soil*, 242:115-122.

- Elser, J.J., Bracken, M.E., Cleland, E.E., Gruner, D.S., Harpole, W.S., Hillebrand, H., Jacqueline T. Ngai, E.W., Seabloom, J.B.S., Smith, J.E. (2007) Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology letters*, 10:1135-1142.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997) Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Brasília, DF.
- EMBRAPA -Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1999) Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. Brasília, DF.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013) Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília, DF.
- Fang, Y., Singh, B.P., Cowie, A., Wang, W., Arachchi, M.H., Wang, H., Tavakkoli, E. (2019) Balancing nutrient stoichiometry facilitates the fate of wheat residue-carbon in physically defined soil organic matter fractions. *Geoderma*, 354:1-12.
- Fanin, N., Fromin, N., Barantal, S., Hättenschwiler, S. (2017) Stoichiometric plasticity of microbial communities is similar between litter and soil in a tropical rainforest. *Scientific reports*, 7:1-7.
- Filley, T.R., Boutton, T.W., Liao, J.D., Jastrow, J.D., Gamblin, D.E. (2008) Chemical changes to nonaggregated particulate soil organic matter following grassland-to-woodland transition in a subtropical savanna. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113:1-11.
- Foloni, J.S.S., Catuchi, T.A., Moraes B.A., Calonego, J.C., Tiritan, C.S. (2016) Acúmulo de nutrientes e relação C-N em diferentes estádios fenológicos do milho submetido à adubação nitrogenada. *Revista Agroambiente on-line*, 10:01-09.

- Fontes, A.G., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Sales, M.V.S., Costa, M.G., Machado, R.C.R. (2014) Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. *Plant and Soil*, 383:313-335.
- Fransson, A.M., Jones, D.L. (2007) Phosphatase activity does not limit the microbial use of low molecular weight organic-P substrates in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 39:1213-1217.
- Frossard, E., Buchmann, N., Bünemann, E.K., Kiba, D.I., Lompo, F., Oberson, A., Tamburini, F., Traoré, O.Y. (2016) Soil properties and not inputs control carbon: nitrogen: phosphorus ratios in cropped soils in the long term. *Soil*, 2:83-99.
- Gama-Rodrigues, A.C. (2004) Ciclagem de nutrientes em sistemas agroflorestais na região tropical: funcionalidade e sustentabilidade. *In*: Müller, M. W., Gama-Rodrigues, A.C., Brandão, I.C.F.L., Serôdio, M.H.C.F. *Sistemas agroflorestais, tendência da agricultura ecológica nos trópicos: Sustento da vida e sustento de vida*. Ilhéus: Sociedade Brasileira de Sistemas Agroflorestais-CEPLAC-UENF, p. 64-84.
- Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Brito, E.C.D. (2007) Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos culturais de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho-Amarelo na região Noroeste Fluminense (RJ). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31:1421-1428.
- Gama-Rodrigues, A.C., Sales, M.V. S., Silva, P.S.D., Comerford, N.B., Cropper, W.P., Gama-Rodrigues, E.F. (2014) An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. *Biogeochemistry*, 118:453-469.
- Gama-Rodrigues, E.F., Nair, P.R., Nair, V.D., Gama-Rodrigues, A.C., Baligar, V.C., Machado, R.C. (2010) Carbon storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Environmental management*, 45: 274-283.

- Gatiboni, L.C. (2003) Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas. Doutorado em Agronomia. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria - RS, , 247p.
- Gelaw, A.M., Singh, B.R., Lal, R. (2014) Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a semi-arid watershed in Tigray, Northern Ethiopia. *Agriculture, ecosystems e environment*, 188:256-263.
- Gressel, N., McColl, J.G., Preston, C.M., Newman, R.H., Powers, R.F. (1996). Linkages between phosphorus transformations and carbon decomposition in a forest soil. *Biogeochemistry*, 33:97-123.
- Guareschi, R.F., Pereira, M.G., Menezes, C.E.G., Anjos, L.H.C., Correia, M.E.F. (2014) Atributos químicos e físicos do solo sob Pastagem e estádios sucessionais de floresta estacional. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 113:47-56.
- Guareschi, R.F., Pereira, M.G., Perin, A. (2012) Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no cerrado goiano. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 36:909-920.
- Guerra, J.G.M., Almeida, D.L., Santos, G.A., Fernandes, M.S. (1996) Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 31:291-299.
- Giweta, M. (2020) Role of litter production and its decomposition, and factors affecting the processes in a tropical forest ecosystem: a review. *Journal of Ecology and Environment*, 44:11.
- Hättenschwiler, S., Jørgensen, H.B. (2010) Carbon quality rather than stoichiometry controls litter decomposition in a tropical rain forest. *Journal of Ecology*, 98:754-763.

- Hentz, P., Carvalho, N.L., Luz, L.V., Barcellos, A.L. (2014) Ciclagem de nitrogênio em sistemas de integração lavoura-pecuária. *Ciência e Natura*, 36:663-676.
- Hessen, D.O., Elser, J.J., Sterner, R.W., Urabe, J. (2013) Ecological stoichiometry: an elementary approach using basic principles. *Limnology and Oceanography*, 58:2219-2236.
- Heuck, C., Spohn, M. (2016) Carbon, nitrogen and phosphorus net mineralization in organic horizons of temperate forests: stoichiometry and relations to organic matter quality. *Biogeochemistry*, 131:229-242.
- Heuck, C., Weig, A., Spohn, M. (2015) Soil microbial biomass C: N: P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus. *Soil Biology and Biochemistry*, 85:119-129.
- Hartemink, A.E. (2005) Nutrient stocks, nutrient cycling, and soil changes in cocoa ecosystems: a review. *Advances in agronomy*, 86:227-253.
- Holanda, A.C., Feliciano, A.L.P., Marangon, L.C., Freire, F.J., Holanda, E.M. (2015) Decomposição da serapilheira foliar e respiração edáfica em um remanescente de Caatinga na Paraíba. *Revista Árvore*, 39:245-254.
- Huang, J., Wang, P., Niu, Y., Yu, H., Ma, F., Xiao, G., Xu, X. (2018) Changes in C: N: P stoichiometry modify N and P conservation strategies of a desert steppe species *Glycyrrhiza uralensis*. *Scientific reports*, 8:1-9.
- Hui, D., Yang, X., Deng, Q., Liu, Q., Wang, X., Yang, H., Ren, H. (2021) Soil C: N: P stoichiometry in tropical forests on Hainan Island of China: Spatial and vertical variations. *Catena*, 201:1-10.
- Innangi, M., Alessandro, F., Fioretto, A., Di Febbraro, M. (2015) Modeling distribution of Mediterranean beech forests and soil carbon stock under climate change scenarios. *Climate Research*, 66:25-36.

- Koutika, L.S, Epron, D., Bouillet, J.P., e Mareschal, L. (2014) Changes in N and C concentrations, soil acidity and P availability in mixed tropical acacia and eucalyptus plantations in nutrient-poor sandy soil. *Plant and Soil*, 379:205-216.
- Kaba, J.S., Yamoah, F.A., Acquaye, A. (2021) Towards sustainable agroforestry management: Harnessing the nutritional soil value through cocoa mix waste. *Waste Management*, 124:264-272.
- Kantola, I.B. (2012) Biogeochemistry of woody plant invasion: phosphorus cycling and microbial community composition. Doctor Philosophy. Texas A&M University, Texas - EUA, 144p.
- Kassa, H., Dondeyne, S., Poesen, J., Frankl, A., Nyssen, J. (2017) Impact of deforestation on soil fertility, soil carbon and nitrogen stocks: the case of the Gacheb catchment in the White Nile Basin, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems e Environment*, 247:273-282.
- Kassambara, A., Mundt, F. (2017) Package 'factoextra'. Extract and visualize the results of multivariate data analyses, 1:1-76.
- Khalil, M.I., Hossain, M.B., Schmidhalter, U. (2005) Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials. *Soil Biology and Biochemistry*, 37:1507-1518.
- Kirby, K.R., Potvin, C. (2007) Variation in carbon storage among tree species: Implications for the management of a small-scale carbon sink project. *Forest Ecology and Management*, 246:208-221.
- Kirkby, C.A., Richardson, A.E., Wade, L.J., Batten, G.D., Blanchard, C., Kirkegaard, J.A. (2013) Carbon-nutrient stoichiometry to increase soil carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 60:77-86.

- Kirkby, C.A., Richardson, A.E., Wade, L.J., Conyers, M., Kirkegaard, J.A. (2016) Inorganic nutrients increase humification efficiency and C-sequestration in an annually cropped soil. *PLoS One*, 11:1-17.
- Kirsten, M., Kaaya, A., Klinger, T., Feger, K.H. (2016) Stocks of soil organic carbon in forest ecosystems of the Eastern Usambara Mountains, Tanzania. *Catena*, 137:651-659.
- Kruse, J., Abraham, M., Amelung, W., Baum, C., Bol, R., Kühn, O., Lewandowski, H., Niederberger, J., Oelmann, y., Rüger, C., Santner, S., Siebers, M., Siebers, N., Spohn, M., Vestergren, J., Vogts, A., Leinweber, P. (2015) Innovative methods in soil phosphorus research: A review. *Journal of plant nutrition and soil science*, 178:43-88.
- Kumar, R., Bhatnagar, P.R., Kakade, V., Dobhal, S. (2020) Tree plantation and soil water conservation enhances climate resilience and carbon sequestration of agroecosystem in semi-arid degraded ravine lands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 282:1-11.
- Ladd, B., Laffan, S.W., Amelung, W., Peri, P.L., Silva, L.C., Gervassi, P., Bonser, S.P., Navall, M., Sheil, D. (2013) Estimates of soil carbon concentration in tropical and temperate forest and woodland from available GIS data on three continents. *Global Ecology and Biogeography*, 22:461-469.
- Lal, R. (2010) Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *BioScience*, 60:708-721.
- Lehmann, J., Günther, D., Mota, M.S., Almeida, M.P., Zech, W., Kaiser, K. (2001) Inorganic and organic soil phosphorus and sulfur pools in an Amazonian multistrata agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 53:113-124.
- Leite, J.N.F., Cruz, M.C.P., Ferreira, M.E., Andrioli, I., Braos, L.B. (2016) Frações orgânicas e inorgânicas do fósforo no solo influenciadas por plantas de cobertura e adubação nitrogenada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51:1880-1889.

- Li, Y., Wu, J., Liu, S., Shen, J., Huang, D., Su, Y., Wei, W., Syers, J.K. (2013) Is the C:N:P stoichiometry in soil and soil microbial biomass related to the landscape and land use in southern subtropical China? *Global Biogeochemical Cycles*, 26: 1-14.
- Liao, J.D., Boutton, T.W., Jastrow, J.D. (2006) Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 38:3184-3196.
- Liu, P., Wang, Q., Bai, J., Gao, H., Huang, L., Xiao, R. (2010) Decomposition and return of C and N of plant litters of *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* in typical wetlands of the Yellow River Delta, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2:1717-1726.
- Liu, R., Wang, D. (2020) Soil C, N, P and K stoichiometry affected by vegetation restoration patterns in the alpine region of the Loess Plateau, Northwest China. *PloS one*, 15:1-17.
- Lorenz, K., Lal, R. (2014) Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34:443-454.
- Luchese, E.B. (2002) *Fundamentos da química do solo: teoria e prática*. 1. Ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 160p.
- Ma, R., Hu, F., Liu, J., Wang, C., Wang, Z., Liu, G., Zhao, S. (2020) Shifts in soil nutrient concentrations and C: N: P stoichiometry during long-term natural vegetation restoration. *PeerJ*, 8:1-20.
- Machado, D.M., Schossler, T.R., Zuffo, A.M., Andrade, F.R., Piauilino, A.C. (2012) Atividades Microbianas e as Transformações no Ciclo dos Elementos no Solo. *Enciclopédia Biosfera*, 8:180-195.

- Mafra, Á.L., Guedes, S.D.F.F., Klauberg Filho, O., Santos, J.C.P., Almeida, J.A.D., Rosa, J.D. (2008) Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. *Revista Árvore*, 32:217-224.
- Maluf, H.J.G.M., Soares, E.M.B., Silva, I.R.D., Neves, J.C.L., Silva, L.D.O.G. (2015) Decomposição de resíduos de culturas e mineralização de nutrientes em solo com diferentes texturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39:1681-1689.
- Manzoni, S., Čapek, P., Mooshammer, M., Lindahl, B.D., Richter, A., Šantrůčková, H. (2017) Optimal metabolic regulation along resource stoichiometry gradients. *Ecology Letters*, 20:1182-1191.
- Manzoni, S., Jackson, R.B., Trofymow, J.A., Porporato, A. (2008) The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization. *Science*, 321:684-686.
- Manzoni, S., Trofymow, J.A., Jackson, R.B., Porporato, A. (2010) Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter. *Ecological Monographs*, 80:89-106.
- Marafon, G. (2017) Frações de carbono e fósforo no solo em ambientes agrícolas, e naturais com e sem queimadas no cerrado. Mestrado em Solo e Nutrição de Plantas. Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina - PI, 58p.
- Marin, A.M.P. (2002) Impactos de um sistema agroflorestal com café na qualidade do solo. Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa - MG, 93p.
- Martinazzo, R., Santos, D.R.D., Gatiboni, L.C., Brunetto, G., Kaminski, J. (2007) Microbial phosphorus in a soil under no-tillage as affected by soluble phosphorus addition. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31:563-570.
- Marty, C., Houle, D., Gagnon, C. (2015) Variation in stocks and distribution of organic C in soils across 21 eastern Canadian temperate and boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 345:29-38.

- Mattos, G.S. (2016) Estoque de carbono orgânico do solo em sistemas agroflorestais com Seringueira no sul do estado da Bahia, Brasil. Doutorado em Produção Vegetal. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, 70p.
- Mbow, C., Smith, P., Skole, D., Duguma, L., Bustamante, M. (2014) Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6:8-14.
- McGill, W.B., Cole, C.V. (1981) Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. *Geoderma*, 26:267-286.
- Medrado, M.J.S (2000) Sistemas agroflorestais: aspectos básicos e indicações. *In*: Galvão, A.P.M. Reflorestamento de propriedades rurais para fins produtivos e ambientais: um guia para ações municipais e regionais. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia/Colombo: Embrapa Florestas, p.269-312.
- Mello, F.D., Sobrinho, M.D.B., Arzolla, S., Silveira, R.I., Cobra Netto, A., Kiehl, J.D.C. (1983) Fertilidade do solo. 1. ed. São Paulo: Nobel, 400p.
- Monroe, P.H.M., Gama-Rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A.C., Marques, J.R.B. (2016) Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agriculture, Ecosystems e Environment*, 221:99-108.
- Mooshammer, M., Wanek, W., Hämmerle, I., Fuchslueger, L., Hofhansl, F., Knoltsch, A., Schneckner, J., Takriti, V., Watzka, M., Wild, B., Keiblinger, K.M., Zechmeister-Boltenstern, S., Richter, A. (2014) Adjustment of microbial nitrogen use efficiency to carbon: nitrogen imbalances regulates soil nitrogen cycling. *Nature communications*, 5:1-7.
- Moreira, F.D.S., Siqueira, J.O. (2001) *Biologia e bioquímica do solo*. 2. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 744p.

- Moreira, F.M.D.S., Siqueira, J.O. (2006) *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. 2. ed. Lavras: UFLA. 729p.
- Müller, M.W., Gama-Rodrigues, A.C. (2012) *Sistemas agroflorestais de cacau*. In: Valle, R.R. *Ciência, Tecnologia e Manejo da Árvore de Cacau*. 1. ed. Brasília: Ceplac/Cepec, p.246-271.
- Murphy, J.A.M.E.S., Riley, J.P. (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chimica acta*, 27:31-36.
- Murthy, I.K., Gupta, M., Tomar, S., Munsri, M., Tiwari, R., Hegde, G.T., Ravindranath, N.H. (2013) Carbon sequestration potential of agroforestry systems in India. *J Earth Sci Climate Change*, 4:1-7.
- Naik, S.K., Maurya, S., Mukherjee, D., Singh, A.K., Bhatt, B.P. (2018) Rates of decomposition and nutrient mineralization of leaf litter from different orchards under hot and dry sub-humid climate. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64:560-573.
- Nair, P.K.R. (1993) *An Introduction to Agroforestry*. 1. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 499p.
- Nair, P.K.R. (2012) Carbon sequestration studies in agroforestry systems: a reality-check. *Agroforestry Systems*, 86:243–253.
- Nair, P.K.R., Kumar, B.V., Nair, V.D. (2009) Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of plant nutrition and soil science*, 172:10-23.
- Nanzer, M.C., Ensinas, S.C., Barbosa, G.F., Barreta, P.G.V., Oliveira, T.P., Silva, J.R.M., Paulino, L.A. (2019) Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 18:136-145.

- Nascimento, A.F.D.J., Silva, T.D.O.D., Araújo, R.N., Sampaio, E.V.D.S.B., Pedrotti, A., Gonzaga, M.I.S., Piscoya, V.C. (2018) Produção e aporte de carbono, nitrogênio e fósforo na serapilheira foliar do Parque Nacional Serra de Itabaiana. *Ciência Florestal*, 28:35-46.
- Ndaw, S.M., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Sales, K.R.N., Rosado, A.S. (2009) Relationships between bacterial diversity, microbial biomass, and litter quality in soils under different plant covers in northern Rio de Janeiro State, Brazil. *Canadian journal of microbiology*, 55:1089-1095.
- Neufeldt, H., Silva, J.E., Ayarza, M.A., Zech, W. (2000) Efeitos do uso da terra nas frações de fósforo em Latossolos do Cerrado. *Biologia e Fertilidade dos Solos*, 31:30-37.
- N'Gbala, F.N.G., Guéi, A.M., Tondoh, J.E. (2017) Carbon stocks in selected tree plantations, as compared with semi-deciduous forests in centre-west Côte d'Ivoire. *Agriculture, Ecosystems e Environment*, 239:30-37.
- Niu, S., Classen, A.T., Dukes, J.S., Kardol, P., Liu, L., Luo, Y., Rustad, L., Sun, J., Tang J., Templer, P.H., Thomas, R.Q., Tian, D., Vicca, S., Wang, Y.P., Xia, J., Zaehle, S. (2016) Global patterns and substrate-based mechanisms of the terrestrial nitrogen cycle. *Ecology letters*, 19:697-709.
- Niether, W., Jacobi, J., Blaser, W.J., Andres, C., Armengot, L. (2020) Cocoa agroforestry systems versus monocultures: a multi-dimensional meta-analysis. *Environmental Research Letters*, 15:104085.
- 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. *Fertilidade do solo*. 2. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 471-550.
- Nunes, R.D.S. (2014) Eficiência de uso do fósforo em sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada por um longo período. *Doutorado em Agronomia*. Universidade de Brasília - UNB, Brasília - DF, 170p.

- Obiri, B.D., Bright, G.A., McDonald, M.A., Anglaaere, L.C., Cobbina, J. (2007) Financial analysis of shaded cocoa in Ghana. *Agroforestry systems*, 71:139-149.
- Ohland, T. (2019) Fracionamento do fósforo e da matéria orgânica do solo em função de diferentes sistemas de cultivo e adubação. Doutorado em Agronomia. Universidade Estadual do Norte do Paraná - UNIOEST, Marechal Cândido Rondon - PR, 125p.
- Oliveira, C.V. (2016) Estoque de carbono em solos sob floresta nativa, sistemas agroflorestais de cacau, plantio de Seringueira e pasto no sul da Bahia, Brasil. Mestrado em Ciências Florestais. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, Vitória da Conquista - BA, 57p.
- Oliveira, C.V., Vicente, L.C., Gama-Rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A.C., Marques, J.R., Barreto-Garcia, P.A. (2019) Carbon and nitrogen stock of Acrisols and Nitisols in South Bahia, Brazil. *Geoderma Regional*, 16:1-9.
- Oliveira, L.B.D., Tiecher, T., Quadros, F.L.F., Santos, D.R.D. (2011) Fósforo microbiano em solos sob Pastagem natural submetida à queima e pastejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:1509-1516.
- Oliveira, T.V., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Aleixo, S., Moreira, R.V.S., Sales, M.V.S., Marques, J.R.B. (2018) Phosphorus transformations in alfisols and ultisols under different land uses in the atlantic forest region of Brazil. *Geoderma Regional*, 14:e 00184.
- Ostrowska, A., Porębska, G. (2015) Assessment of the C/N ratio as an indicator of the decomposability of organic matter in forest soils. *Ecological Indicators*, 49:104-109.
- Pansu, M., Bottner, P., Sarmiento, L., Metselaar, K. (2004) Comparison of five soil organic matter decomposition models using data from a ¹⁴C and ¹⁵N labeling field experiment. *Global Biogeochemical Cycles*, 18:1-11.

- Pansu, M., Sarmiento, L., Rujano, M.A., Ablan, M., Acevedo, D., Bottner, P. (2010) Modeling organic transformations by microorganisms of soils in six contrasting ecosystems: Validation of the MOMOS model. *Global Biogeochemical Cycles*, 24:1-19.
- Parras-Alcántara, L., Lozano-García, B., Brevik, E.C., Cerdá, A. (2015) Soil organic carbon stocks assessment in Mediterranean natural areas: a comparison of entire soil profiles and soil control sections. *Journal of Environmental Management*, 155:219-228.
- Paul, A. (2007) *Soil microbiology, ecology, and biochemistry*, 3rd edn. 3. ed. Fort Collins: Academic press, 539p.
- Pavinato, P.S., Dao, T.H., Rosolem, C.A. (2010) Tillage and phosphorus management effects on enzyme-labile bioactive phosphorus availability in Cerrado Oxisols. *Geoderma*, 156:207-215.
- Peñuelas, J., Sardans, J., Rivas-ubach, A., Janssens, I.A. (2012) The human-induced imbalance between C, N and P. *Global Change Biology*, 18:03-06.
- Perfecto, I., Armbrecht, I., Philpott, S.M., Soto-Pinto, L., Dietsch, T.V. (2007) Shaded coffee and the stability of rainforest margins in northern Latin America. *In: Tschardtke, T., Leuschner, C., Zeller, M., Guhardja, E., Bidin, A. (eds.) Stability of tropical rainforest margins: Linking ecological, economic and social constraints of land use and conservation*. 1. ed. Berlin: Springer, p. 225-261.
- Petit-Aldana, J., Rahman, M.M., Parraguirre-Lezama, C., Infante-Cruz, A., Romero-Arenas, O. (2019) Litter decomposition process in coffee agroforestry systems. *Journal of Forest and Environmental Science*, 35:121-139.
- Piaszczyk, W., Błońska, E., Lasota, J., e Lukac, M. (2019) A comparison of C: N: P stoichiometry in soil and deadwood at an advanced decomposition stage. *Catena*, 179:1-5.

- Pinho, R.C., Miller, R.P., Alfaia, S.S. (2012) Agroforestry and the improvement of soil fertility: a view from Amazonia. *Applied and environmental soil science*, 2012:1-11.
- Png, G.K., Turner, B.L., Albornoz, F.E., Hayes, P.E., Lambers, H., Laliberté, E. (2017) Greater root phosphatase activity in nitrogen-fixing rhizobial but not actinorhizal plants with declining phosphorus availability. *Journal of Ecology*, 105:1246-1255.
- Prasad, J.V.N.S., Srinivas, K., Rao, C.S., Ramesh, C., Venkatravamma, K., Venkateswarlu, B. (2012) Biomass productivity and carbon stocks of farm forestry and agroforestry systems of leucaena and eucalyptus in Andhra Pradesh, India. *Current Science*, 103:536-540.
- Pretty, J., Benton, T.G., Bharucha, Z.P., Dicks, L.V., Flora, C.B., Godfray, H.C.J., Goulson, D., Hartley, S., Lampkin, N., Morris, C., Pierzynski G., Prasad, P.V.V., Reganold J., Rockström J., Smith P., Thorne, P., Wratten, S. (2018) Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1:441-446.
- Primo, A.A., Araújo, M.D.M., Silva, K.F., Silva, L.A., Pereira, G.A.C., Fernandes, F.E.P., Pompeu, R.C.F.F., Natale, W., Souza, H.A. (2021) Litter production and nutrient deposition from native woody species in the Brazilian semi-arid region. *Agroforest Syst*, 95:1459–1464
- Quan, Q., Wang, C., He, N., Zhang, Z., Wen, X., Su, H., Xue, J. (2014) Forest type affects the coupled relationships of soil C and N mineralization in the temperate forests of northern China. *Scientific reports*, 4:1-8.
- Radomski, M.I., Oliveira, B.T. (2018) Produção de biomassa aérea e teor de nutrientes de *Erythrina speciosa* e *Tithonia diversifolia* cultivadas em Morretes, PR: resultados iniciais. *Embrapa Florestas - Infoteca-E*, 432:1-15.

- Rangel, O.J.P., Silva, C.A., Guimarães, P.T.G., Melo, L.C.A., Oliveira Junior, A.C.D. (2008) Carbono orgânico e nitrogênio total do solo e suas relações com os espaçamentos de plantio de cafeeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:2051-2059.
- Rheinheimer, D.S., Anghinoni, I. (2003) Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems under subtropical conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34:2339-2354.
- Ribaski, J., Vilcahuaman, L.J.M., Rodigheri, H.R. (2001) Sistemas agroflorestais: aspectos ambientais e sócio-econômicos. Belo Horizonte: Informe Agropecuário, 61-6p.
- Richardson, A.E., Hocking P.J., Simpson R.J., George T.S. (2009) Mecanismos de plantas para otimizar o acesso ao fósforo do solo. *Crop Past Sci*, 60:124–143.
- Rodrigues, R., Mello, W.Z., Conceição, M.C.G., Souza, P.A., Silva, J.J.N. (2017) Dinâmica do nitrogênio em sistemas agrícolas e florestais tropicais e seu impacto na mudança do clima. *Revista Virtual de Química*, 9:1868-1886.
- Rumpel, C., Kögel-Knabner, I. (2011) Deep soil organic matter-a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and soil*, 338:143-158.
- Santhyami, S., Basukriadi, A., Patria, M.P., e Abdulhadi, R. (2022) Produção de serapilheira em sistemas agroflorestais à base de cacau no oeste de Sumatra, Indonésia. *Planta Tropika: Jurnal Agrosains*, 10:102-110.
- Sales, A., Silva, A.R., Veloso, C.A.C., Carvalho, E.J.M., Miranda, B.M. (2018) Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia Legal. *Revista Unioeste*, 14:01-15.
- Sales, M.V., Aleixo, S., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F. (2017) Structural equation modeling for the estimation of interconnections between the P cycle and soil properties. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 109:193-207.

- Santi, A., Amado, T.J.C., Acosta, J.A.A. (2003) Adubação nitrogenada na aveia preta: Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27:1075-1083.
- Santiago, L.S. (2015) Nutrient limitation of eco-physiological processes in tropical trees. *Trees*, 29:1291-1300.
- Santos, E., Martins, K.G., Marques, R. (2020) Mineralização do nitrogênio no solo sob floresta ombrófila densa das terras baixas, em Paranaguá, PR-Brasil. *Nativa*, 8:558-566.
- Santos, E.D. (2007). Carbono, nitrogênio e relação C/N em Gleissolo e Cambissolo sob diferentes tipologias vegetais na área de ocorrência da floresta ombrófila densa. Mestrado em Ciências do Solo. Universidade Federal do Paraná – UFPR, Antonina - PR, 104p.
- Sávio, F.L., Silva, G.C., Teixeira, I.R., Borém, A. (2011) Produção de biomassa e conteúdo de silício em gramíneas forrageiras sob diferentes fontes de silicato. *Semina: Ciências Agrárias*, 32:103-110.
- Schmidt, M.W., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., Manning, D. (2011) Soil organic matter persistence as an ecosystem property. *Nature*, 478:49-56.
- Schneider, M.P.W., Scheel, T., Mikutta, R., Van Hees, P., Kaiser, K., Kalbitz, K. (2010) Sorptive stabilization of organic matter by amorphous Al hydroxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74:1606-1619.
- Schomberg, H.H., Wietholter, S., Griffin, T.S., Reeves, D.W., Cabrera, M.L., Fisher, D.S., Endale, D.M., Novak, J.M., Balkcom, K.S., Raper, R.L., Kitchen, N.R., Locke, M.A., Potter, K.N., Schwartz, R.C., Truman, C.C., Tyler, D.D (2009) Assessing indices for predicting potential nitrogen mineralization in soils under

different management systems. *Soil Science Society of America Journal*, 73:1575-1586.

Schoeneberger, M., Bentrup, G., De Gooijer, H., Soolanayakanahally, R., Sauer, T., Brandle, J., Zhou, X., Current, D. (2012) Branching out: Agroforestry as a climate change mitigation and adaptation tool for agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67:128A-136A.

Seiffert, N.F. (1980) Gramíneas forrageiras do gênero *Brachiaria*. 1. Ed. Campo Grande: Embrapa-CNPGC, 83p.

Silva, C.A., Vale, F.R.D., Anderson, S.J., Koba, A.R. (1999) Mineralização de nitrogênio e enxofre em solos brasileiros sob influência da calagem e fósforo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34:1679-1689.

Silva, I.C. (2014) Sistemas Agroflorestais no Brasil: aspectos conceituais e conjunturais. *In: Giménez, A. M. e Bolzón, G. I., (eds). Educación e Investigación Forestal Para un Equilibrio Vital: Cooperación Binacional Brasil Argentina. Córdoba: Brujas, p. 197-215.*

Silva, I.R., Mendonça, E.S (2007) Matéria orgânica do solo. *In: Novais, R.F., Alvarez, V.H., Barros, N.F., Fontes, R.L.F., Cantarutti, R.B., Neves, J.C.L. Fertilidade do solo. 2. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.275-374.*

Silva, R.J., Brancalion, P.H.S., Rodrigues, R.R. (2017) Impactos do manejo florestal na ciclagem do nitrogênio: implicações para a conservação de florestas tropicais. *South American Journal of Basic Education, Technical and Technological*, 4:240-249.

Snapp, S.S., Blackie, M.J., Gilbert, R.A., Bezner-Kerr, R., Kanyama-Phiri, G.Y. (2010) Biodiversity can support a greener revolution in Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107:20840-20845.

- Song, B.L., Yan, M.J., Hou, H., Guan, J.H., Shi, W.Y., Li, G.Q., Du, S. (2016) Distribution of soil carbon and nitrogen in two typical forests in the semiarid region of the Loess Plateau, China. *Catena*, 143:159-166.
- Souza Júnior, R.F.D., Oliveira, F.H.T.D., Santos, H.C., Freire, F.J., Arruda, J.A.D. (2012) Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36:159-170.
- Souza, L.M., Schlemmer, F., Alencar, P.M., Lopes, A.A.C., Passos, S.R., Xavier, G.R., Fernandes, M.F., Mendes, I.C., Reis Junior, F.B. (2012) Estrutura metabólica e genética de comunidades bacterianas em solo de cerrado sob diferentes manejos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47:269-276.
- Spohn, M. (2020a) Phosphorus and carbon in soil particle size fractions: A synthesis. *Biogeochemistry*, 147:225-242.
- Spohn, M. (2020b) Increasing the organic carbon stocks in mineral soils sequesters large amounts of phosphorus. *Global change biology*, 26:4169-4177.
- Stavi, I., Lal, R. (2013) Agriculture and greenhouse gases, a common tragedy. A review. *Agronomy for sustainable development*, 33:275-289.
- Sterner, R.W., Elser, J.J. (2002) *Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere*. 1. ed. Chicago: Princeton university press, 464p.
- Stewart, C.E., Paustian, K., Conant, R.T., Plante, A.F., Six, J. (2009) Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations. *Soil Biology and Biochemistry*, 41:357-366.
- Sun, J., Gao, P., Li, C., Wang, R., Niu, X., Wang, B. (2019) Ecological stoichiometry characteristics of the leaf–litter–soil continuum of *Quercus acutissima* Carr. and

- Pinus densiflora* Sieb. in Northern China. *Environmental Earth Sciences*, 78:1-13.
- Suo, Y., Yuan, Z., Lin, F., Wang, X., Ye, J., Bai, E., Hao, Z. (2016) Local-scale determinants of elemental stoichiometry of soil in an old-growth temperate forest. *Plant and Soil*, 408:401-414.
- Szott, L.T., Melendez, G. (2001) Phosphorus availability under annual cropping, alley cropping, and multistrata agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 53:125-132.
- Takahashi, S., Anwar, M.R. (2007) Wheat grain yield, phosphorus up take and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. *Field Crops Research*, 101:160-171.
- Tang, Z., Xu, W., Zhou, G., Bai, Y., Li, J., Tang, X., Chen, D., Liue, Q., Maf, W., Xiong, G., Heg, H., Heg, N., Guoa, Y., Guoa, Q., Zhua, J., Hanh, W., Hub, H., Fang, J., Xie, Z. (2018) Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115:4033-4038.
- Taylor, A.R., Wang, J.R., Chen, H.Y. (2007) Carbon storage in a chronosequence of red spruce (*Picea rubens*) forests in central Nova Scotia, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 37:2260-2269.
- Tchichelle, S.V., Epron, D., Mialoundama, F., Koutika, L.S., Harmand, J.M., Bouillet, J.P., Mareschal, L. (2017) Differences in nitrogen cycling and soil mineralisation between a eucalypt plantation and a mixed eucalypt and *Acacia mangium* plantation on a sandy tropical soil. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 79:1-8.
- Tian, H., Chen, G., Zhang, C., Melillo, J. M., Hall, C.A. (2010) Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 98:139-151.

- Tiecher, T., Santos, D.R.D., Kaminski, J., Calegari, A. (2012) Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36:271-282.
- Tscharntke, T., Clough, Y., Bhagwat, S.A., Buchori, D., Faust, H., Hertel, D., Hölscher, D., Kessler, J.J.M., Perfecto, I., Scherber, C., Schroth, G., Veldkamp, E., Wanger, T.C. (2011) Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes—a review. *Journal of applied ecology*, 48:619-629.
- Tipping, E., Benham, S., Boyle, J.F., Crow, P., Davies, J., Fischer, U., Guyatt, H., Helliwell, R., Jackson-Blake, L., Lawler, A.J., Monteith, D.T., Rowe, E.C., Toberman, H. (2014) Atmospheric deposition of phosphorus to land and freshwater. *Environmental Science: Processes e Impacts*, 16:1608-1617.
- Traoré, S., Ouattara, K., Ilstedt, U., Schmidt, M., Thiombiano, A., Malmer, A., Nyberg, G. (2015) Effect of land degradation on carbon and nitrogen pools in two soil types of a semi-arid landscape in West Africa. *Geoderma*, 241:330-338.
- Turner, B.L., Engelbrecht, B.M. (2011) Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests. *Biogeochemistry*, 103:297-315.
- Turner, B.L., Lambers, H., Condon, L.M., Cramer, M.D., Leake, J.R., Richardson, A.E., Smith, S.E. (2013) Soil microbial biomass and the fate of phosphorus during long-term ecosystem development. *Plant and Soil*, 367:225-234.
- Vargas, L.K., Selbach, P.A., Sá, E.L.S. (2004) Alterações microbianas no solo durante o ciclo do milho nos sistemas plantio direto e convencional. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39:749-755.
- Vasconcellos, R.L.D.F., Bini, D., Paula, A.M.D., Andrade, J.B., Cardoso, E.J.B.N. (2013) Nitrogênio, carbono e compactação do solo como fatores limitantes do processo de recuperação de Matas ciliares. *Revista brasileira de Ciência do Solo*, 37:1164-1173.

- Viana, T.O., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Aleixo, S., Moreira, R.V.S., Sales, M.V.S., Marques, J.R.B. (2018) Phosphorus transformations in alfisols and ultisols under different land uses in the Atlantic Forest region of Brazil. *Geoderma Regional*, 14:e00184.
- Viana, T.O. (2016) Frações de fósforo sob diferentes usos e classes de solo na Região Sul da Bahia. Doutorado em Produção Vegetal. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, 70p.
- Vicente, L.C., Gama-Rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A.C. (2016) Soil carbon stocks of Ultisols under different land use in the Atlantic rainforest zone of Brazil. *Geoderma Regional*, 7:330-337.
- Vieira, R.F. (2017) Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas. 1. ed. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 165p.
- Vitousek, P.M., Farrington, H. (1997) Nutrient limitation and soil development: experimental test of a biogeochemical theory. *Biogeochemistry*, 37:63-75.
- Wang, S., Zhu, Z., Yang, R., Yang, L., Ge, B. (2022) Land-Use Conversion Altered Topsoil Properties and Stoichiometry in a Reclaimed Coastal Agroforestry System. *Agronomy*, 12:1143.
- Wang, W., Sardans, J., Zeng, C., Zhong, C., Li, Y., Peñuelas, J. (2014) Responses of soil nutrient concentrations and stoichiometry to different human land uses in a subtropical tidal wetland. *Geoderma*, 232:459-470.
- Wang, Y., Li, Y., Ye, X., Chu, Y., Wang, X. (2010) Profile storage of organic/-inorganic carbon in soil: From forest to desert. *Science of the Total Environment*, 408:1925-1931.
- Wessel, M., Quist-Wessel, P.F. (2015) Cocoa production in West Africa, a review and analysis of recent developments. *Wageningen Journal of Life Sciences*, 74: 1-7.

- Wood, G.A.R. Lass, R.A. (2001) *Cocoa*. 4. ed. Oxford: Blackwell Science, 656p.
- Xie, J., Chang, S., Zhang, Y., Wang, H., Song, C., He, P., Sun, X. (2016) Plant and soil ecological stoichiometry with vertical zonality on the northern slope of the middle Tianshan Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 36:4363-72.
- Yao, M.K., Koné, A.W., Otinga, A.N., Kassin, E.K., and Tano, Y. (2021) Carbon and nutrient cycling in tree plantations versus natural forests: implications for an efficient cocoa agroforestry system in West Africa. *Regional Environmental Change*, 21:1-14.
- Yang, K., Zhu, J., Gu, J., Yu, L., Wang, Z. (2015) Changes in soil phosphorus fractions after 9 years of continuous nitrogen addition in a *Larix gmelinii* plantation. *Annals of Forest Science*, 72:435-442.
- Yang, X., Chen, X., Yang, X. (2019) Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 187:85-91.
- Yang, X., Post, W.M. (2011) Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. *Biogeosciences*, 8:2907-2916.
- Yang, Y., Fang, J., Ji, C., Datta, A., Li, P., Ma, W., Mohammat, A., Shen, H., Hu, H., Knapp, B., Smith, P. (2014) Stoichiometric shifts in surface soils over broad geographical scales: evidence from China's grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 23:947-955.
- Yuan, Z.Y., Jiao, F., Shi, X.R., Sardans, J., Maestre, F.T., Delgado-Baquerizo, M., Reich, P.B., Peñuelas, J. (2017) Experimental and observational studies find contrasting responses of soil nutrients to climate change. *Elife*, 6:01-19.

- Zaia, F.C., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Moço, M.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*, 86:197-212.
- Zaia, F.C., Gama-Rodrigues, A.C.D., Gama-Rodrigues, E.F.D., Machado, R.C.R. (2008) Fósforo orgânico em solos sob agrossistemas de cacau. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:1987-1995.
- Zechmeister-Boltenstern, S., Keiblinger, K.M., Mooshammer, M., Peñuelas, J., Richter, A., Sardans, J., e Wanek, W. (2015) A aplicação da estequiometria ecológica às transformações da matéria orgânica planta-microbiana-solo. *Monografias ecológicas*, 85:133-155.
- Zhang, C., Tian, H., Liu, J., Wang, S., Liu, M., Pan, S., Shi, X. (2005) Pools and distributions of soil phosphorus in China. *Global biogeochemical cycles*, 19:1-9.
- Zhang, J.P., Cheng-De, S.H.E.N., Hai, R., Jun, W.A.N.G., Wei-Dong, H.A.N. (2011) Estimating change in sedimentary organic carbon content during mangrove restoration in southern China using carbon isotopic measurements. *Pedosphere*, 22:58-66.
- Zhang, W., Liu, W., Xu, M., Deng, J., Han, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G. (2019) Response of forest growth to C: N: P stoichiometry in plants and soils during *Robinia pseudoacacia* afforestation on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 337:280-289.
- Zhou, Y., Boutton, T.W., Wu, X.B. (2017a) Soil carbon response to woody plant encroachment: importance of spatial heterogeneity and deep soil storage. *Journal of Ecology*, 105:1738-1749.
- Zhou, Y., Boutton, T.W., Wu, X.B. (2018) Soil C: N: P stoichiometry responds to vegetation change from grassland to woodland. *Biogeochemistry*, 140:341-357.

Zhou, Y., Boutton, T.W., Wu, X.B., Yang, C. (2017b) Spatial heterogeneity of subsurface soil texture drives landscape-scale patterns of woody patches in a subtropical savanna. *Landscape ecology*, 32:915-929.

Zinn, Y.L., Marrenjo, G.J., Silva, C.A. (2018) Soil C:N ratios are unresponsive to land use change in Brazil: A comparative analysis. *Agriculture, ecosystems e environment*, 255:62-72.

APÊNDICE

APÊNDICE

Tabela 1A. Médias e erro padrão da média (EPM) das relações C:N, C:P_o e N:P_o nos sistemas Mata (1), Pastagem (2) e Monocultivo de Seringueira (3) em seis profundidades de um Argissolo Amarelo no sul da Bahia, Brasil.

Sist.	Prof.	C:N	EPM	C:P	EPM	N:P	EPM
1	0-10	2,11	0,0945	240,66	0,0041	113,71	0,0025
1	10-20	2,40	0,1805	313,87	0,0076	128,85	0,0046
1	20-40	2,25	0,2039	684,61	0,0069	305,63	0,0060
1	40-60	1,74	0,1050	1023,20	0,0036	585,32	0,0030
1	60-80	1,49	0,0279	1703,80	0,0023	1142,60	0,0034
1	80-100	1,21	0,0221	2385,20	0,0014	1965,80	0,0016
2	0-10	1,82	0,2080	244,33	0,0083	132,72	0,0039
2	10-20	1,72	0,1326	301,01	0,0051	174,37	0,0031
2	20-40	1,39	0,0749	440,83	0,0021	317,80	0,0010
2	40-60	1,86	0,0827	1837,80	0,0057	992,04	0,0096
2	60-80	1,52	0,0436	1555,10	0,0012	1029,10	0,0030
2	80-100	1,54	0,0559	5609,4	0,0031	4187,50	0,0047
3	0-10	7,32	0,0720	299,20	0,0020	40,91	0,0040
3	10-20	7,40	0,1123	529,25	0,0027	71,73	0,0021
3	20-40	6,10	0,0912	421,58	0,0021	69,36	0,0037
3	40-60	4,65	0,0988	631,92	0,0032	136,42	0,0084
3	60-80	4,29	0,0905	790,56	0,0059	180,78	0,0104
3	80-100	3,67	0,0449	3768,40	0,0128	878,36	0,0053

Tabela 2A. Médias e erro padrão da média (EPM) das relações C:N, C:P₀ e N:P₀ nos sistemas Mata (1), Pastagem (2), Monocultivo de Seringueira (3), Seringueira-Açaí (4) e Seringueira-Cacau (5) em seis profundidades de um Argissolo Acinzentado no sul da Bahia, Brasil.

Sist.	Prof.	C:N	EPM	C:P	EPM	N:P	EPM
1	0-10	14,19	0,0072	470,82	0,0008	34,75	0,0039
1	10-20	10,52	0,0138	285,19	0,0025	29,40	0,0045
1	20-40	9,95	0,0111	488,11	0,0030	62,72	0,0028
1	40-60	16,03	0,0397	622,76	0,0047	73,32	0,0013
1	60-80	10,70	0,0394	1050,20	0,0031	179,83	0,0081
1	80-100	7,11	0,0490	3172,2	0,0018	1000,10	0,0020
2	0-10	5,53	0,0025	359,95	0,0004	65,17	0,0012
2	10-20	4,92	0,0057	364,57	0,0005	74,17	0,0006
2	20-40	3,52	0,0213	453,40	0,0021	127,84	0,0014
2	40-60	2,38	0,0163	599,55	0,0016	253,01	0,0027
2	60-80	2,13	0,0217	662,26	0,0016	310,88	0,0017
2	80-100	7,63	0,0399	1975,00	0,0013	484,73	0,0014
3	0-10	4,21	0,0028	276,53	0,0010	65,65	0,0013
3	10-20	3,31	0,0047	226,51	0,0009	68,34	0,0008
3	20-40	2,63	0,0212	357,89	0,0026	134,94	0,0024
3	40-60	2,29	0,0318	505,91	0,0025	218,71	0,0020
3	60-80	1,92	0,0104	1760,60	0,0027	900,79	0,0032
3	80-100	1,81	0,0152	1989,20	0,0014	1089,30	0,0015
4	0-10	5,67	0,0193	247,33	0,0033	43,56	0,0004
4	10-20	4,13	0,0142	202,99	0,0021	48,96	0,0005
4	20-40	3,41	0,0074	269,04	0,0011	78,74	0,0006
4	40-60	2,85	0,0434	322,01	0,0020	114,36	0,0014
4	60-80	2,27	0,0279	462,97	0,0020	202,76	0,0018
4	80-100	2,09	0,0183	854,50	0,0010	406,04	0,0008
5	0-10	6,67	0,0103	203,73	0,0017	30,75	0,0013
5	10-20	4,99	0,0226	162,44	0,0037	32,55	0,0006
5	20-40	3,97	0,0202	173,55	0,0018	43,96	0,0008
5	40-60	3,27	0,0201	216,45	0,0014	66,44	0,0009
5	60-80	2,88	0,0212	308,34	0,0005	108,66	0,0026
5	80-100	2,49	0,0517	952,81	0,0042	198,68	0,0037

Tabela 3A. Médias e erro padrão da média (EPM) das relações C:N, C:P_O e N:P_O, nos sistemas Seringueira-Cacau (1) e Eritrina-Cacau (2) em seis profundidades de um Nitossolo Háplico no sul da Bahia, Brasil.

Sist.	Prof.	C:N	EPM	C:P	EPM	N:P	EPM
1	0-10	3.31	0.1668	112.64	0.0006	31.58	0.0933
1	10-20	2.90	0.4192	103.75	0.0028	39.46	0.1309
1	20-40	2.48	0.2643	161.15	0.0033	69.08	0.1245
1	40-60	1.96	0.2765	204.11	0.0053	115.74	0.1770
1	60-80	1.87	0.2221	232.11	0.0032	130.43	0.1141
1	80-100	1.40	0.0378	327.11	0.0036	231.82	0.0535
2	0-10	7.14	0.0858	319.88	0.0013	44.73	0.0141
2	10-20	5.31	0.1792	218.69	0.0024	41.17	0.0249
2	20-40	3.59	0.0934	189.68	0.0041	52.69	0.0491
2	40-60	3.14	0.1069	299.55	0.0029	95.37	0.0454
2	60-80	2.64	0.1124	408.37	0.0001	155.96	0.0345
2	80-100	2.38	0.0342	649.04	0.0040	273.88	0.1229

Tabela 4A. Teores médios (g kg^{-1}) de Carbono Orgânico Total (C_{OT}), Nitrogênio Total (N_{T}) e Fósforo Orgânico (P_{O}) das diferentes camadas de três classes de solos sob diferentes sistemas de uso da terra no sul da Bahia.

Sistemas	C_{OT} (g kg^{-1})					
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-10
1	19.30	21.87	21.73	16.33	13.50	10.37
2	18.00	15.90	12.37	18.20	14.23	12.23
3	23.00	23.03	15.23	10.97	8.87	7.93
4	38.37	22.10	19.03	13.90	9.40	6.90
5	30.63	26.23	16.53	10.53	8.90	7.73
6	25.27	17.60	13.37	11.40	9.33	8.57
7	34.07	22.77	17.33	14.43	10.50	9.80
8	29.37	18.03	13.27	10.40	9.13	8.37
9	25.07	17.37	14.53	11.13	10.87	10.30
10	44.67	25.07	13.43	10.40	8.27	7.33
Sistemas	N_{T} (g kg^{-1})					
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-10
1	10.67	10.47	11.13	10.93	10.57	10.00
2	11.47	10.73	10.37	11.47	10.93	10.70
3	3.67	3.63	2.93	2.77	2.43	2.53
4	3.30	2.63	2.43	1.70	1.57	1.63
5	6.47	6.23	5.50	5.17	4.90	1.63
6	7.00	6.20	5.93	5.83	5.67	5.53
7	7.00	6.43	5.93	5.87	5.40	5.47
8	5.17	4.23	3.93	3.73	3.73	4.07
9	8.23	7.63	7.23	7.20	7.20	8.57
10	7.30	5.50	4.37	3.87	3.67	3.60
Sistemas	P_{O} (g kg^{-1})					
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-10
1	0.63	0.54	0.34	0.20	0.15	0.09
2	0.58	0.49	0.33	0.18	0.12	0.04
3	0.56	0.43	0.33	0.19	0.10	0.06
4	0.55	0.48	0.32	0.22	0.16	0.05
5	0.58	0.49	0.36	0.20	0.13	0.06
6	0.63	0.58	0.37	0.25	0.13	0.07
7	0.88	0.78	0.54	0.38	0.29	0.19
8	0.95	0.80	0.69	0.48	0.35	0.21
9	4.42	3.83	2.19	1.53	1.10	0.59
10	2.90	2.61	1.70	0.92	0.61	0.37

Sistemas: Mata (1), Pastagem (2), Monocultivo de Seringueira (3), Mata (4), Pastagem (5), Monocultivo de Seringueira (6), Seringueira-Açaí (7), Seringueira-Cacau (8) Seringueira-

Cacau (9), Eritrina-Cacau (10). Os sistemas de 1 a 3 estão dispostos sob Argissolo Amarelo; de 4 a 8 sob Argissolo Acinzentado e de 9 a 10 sob Nitossolo Háplico.

Tabela 5A. Quantidades médias (kg ha^{-1}) de Carbono Orgânico Total (C_{OT}), Nitrogênio Total (N_{T}) e Fósforo Orgânico (P_{O}) das diferentes camadas de três classes de solos sob diferentes sistemas de uso da terra no sul da Bahia.

Sistema	C_{OT} (Kg ha^{-1})					
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
1	25303	32608	65253	48059	39992	29050
2	23599	23710	37130	53551	42165	34281
3	30154	34347	45737	32268	26267	22231
4	35117	27342	46491	39290	25641	24324
5	45261	25809	39832	30393	25228	22943
6	46845	29638	52574	37839	24083	17678
7	35257	33606	45007	28252	23159	20433
8	29333	21137	33711	28751	21484	20234
9	26592	17555	31999	20056	22186	21029
10	47385	25338	29577	18735	16878	14972
Sistema	N_{T} (Kg ha^{-1})					
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
1	13973	15595	33399	32143	31277	27999
2	15021	15992	31099	33711	32362	29959
3	4803	5414	8800	8134	7203	7093
4	7210	7720	15901	15957	13176	13557
5	7956	6054	11800	10901	10304	11142
6	4026	3529	6716	4624	4011	4181
7	7437	7978	14960	13846	12740	4312
8	8120	7440	14952	14700	13033	13058
9	8727	7710	15913	12960	14688	17476
10	7738	5555	9606	6960	7480	7344
Sistema	P_{O} (Kg ha^{-1})					
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
1	272	268	246	123	62	32
2	251	203	217	86	70	18
3	260	167	280	135	93	33
4	591	520	624	394	293	208
5	556	423	557	265	144	89
6	257	269	284	167	65	21
7	253	238	261	126	93	29
8	274	241	249	152	45	29
9	377	294	367	206	122	61
10	395	291	435	224	156	64

Sistemas: Mata (1), Pastagem (2), Monocultivo de Seringueira (3), Mata (4), Pastagem (5), Monocultivo de Seringueira (6), Seringueira-Açaí (7), Seringueira-Cacau (8) Seringueira-

Cacau (9), Eritrina-Cacau (10). Os sistemas de 1 a 3 estão dispostos sob Argissolo Amarelo; de 4 a 8 sob Argissolo Acinzentado e de 9 a 10 sob Nitossolo Háplico.