

**FÓSFORO ORGÂNICO NOS SOLOS BRASILEIROS:  
HISTÓRICO DA PESQUISA, PERSPECTIVAS E MANEJO  
COM FOCO EM SERVIÇOS AMBIENTAIS**

**LAÍS CHIERICI BERNARDES RINALDI ALVARENGA**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
AGOSTO – 2022**

**FÓSFORO ORGÂNICO NOS SOLOS BRASILEIROS:  
HISTÓRICO DA PESQUISA, PERSPECTIVAS E MANEJO  
COM FOCO EM SERVIÇOS AMBIENTAIS**

**LAÍS CHIERICI BERNARDES RINALDI ALVARENGA**

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em Produção Vegetal, com ênfase em Solos e Nutrição de Plantas”

Orientador: Prof. Antonio Carlos da Gama-Rodrigues

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
AGOSTO - 2022

**FICHA CATALOGRÁFICA**

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

R578

Rinaldi, Laís Chierici Bernardes.

FÓSFORO ORGÂNICO NOS SOLOS BRASILEIROS : HISTÓRICO DA PESQUISA, PERSPECTIVAS E MANEJO COM FOCO EM SERVIÇOS AMBIENTAIS / Laís Chierici Bernardes Rinaldi. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2022.

125 f.

Inclui bibliografia.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2022.

Orientador: Antonio Carlos da Gama-Rodrigues.

1. Fósforo Orgânico . 2. Floresta plantada. 3. Meta-análise . 4. Revisão Sistemática . 5. Agrofloresta. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

FÓSFORO ORGÂNICO NOS SOLOS BRASILEIROS:  
HISTÓRICO DA PESQUISA, PERSPECTIVAS E MANEJO  
COM FOCO EM SERVIÇOS AMBIENTAIS

**LAÍS CHIERICI BERNARDES RINALDI ALVARENGA**

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em Produção Vegetal, com ênfase em Solos e Nutrição de Plantas”

Aprovada em 31 de agosto de 2022

Comissão Examinadora:

---

Prof. Gabriel Ramatis Pugliese Andrade (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) –  
UENF

---

Prof.<sup>a</sup> Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues (Ph.D., Ciência do Solo) – UENF

---

Prof. Alexandre Gomes Fonte (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) – IFES

---

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

A Deus;  
Aos meus pais;  
Ao meu irmão Danilo;  
À Carlos Alvarenga, carinho e apoio.

Dedico

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e ao Laboratório de Solos, pela oportunidade do desenvolvimento do projeto e pela concessão da bolsa;

Aos meus pais e ao meu irmão que me deram suporte em toda a caminhada até aqui;

Ao meu marido Carlos Alberto pelo apoio e compreensão;

Ao meu orientador Antonio Carlos da Gama-Rodrigues, pela orientação e pela oportunidade de desenvolvermos um projeto novo na área dos solos;

Aos membros da banca, Dr. Alexandre Gomes Fontes, Dr. Gabriel Ramatis e Dr<sup>a</sup>. Emanuela Gama-Rodrigues, por contribuírem com melhorias para o trabalho;

À professora Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues pela amizade, acolhimento e cooperação na minha formação;

À todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meus agradecimentos.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
RESUMO GRÁFICO .....	viii
ABSTRACT .....	ii
1. INTRODUÇÃO.....	4
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	7
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	18
3. TRABALHOS .....	24
3.1 FÓSFORO ORGÂNICO NOS SOLOS BRASILEIROS SOB DIFERENTES USOS DA TERRA, CLASSES DE SOLO E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS – UMA SÍNTESE .....	24
RESUMO .....	24
INTRODUÇÃO .....	25
MATERIAL E MÉTODOS.....	27
RESULTADOS.....	31
DISCUSSÃO .....	50
CONCLUSÃO .....	53
RECONHECIMENTOS E FINANCIAMENTO .....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
3.2 CONTRIBUIÇÃO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS NOS TEORES DE FÓSFORO ORGÂNICO DO SOLO NO BRASIL: UMA META-ANÁLISE .....	83
RESUMO .....	83
INTRODUÇÃO .....	84
MATERIAIS E MÉTODOS .....	86
RESULTADOS.....	90

DISCUSSÃO .....	103
CONCLUSÃO .....	106
RECONHECIMENTOS E FINANCIAMENTO .....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
4. RESUMO E CONCLUSÕES.....	113
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	115



## RESUMO

ALVARENGA, Laís Chierici Bernardes Rinaldi; D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Agosto, 2022; Fósforo orgânico nos solos brasileiros: histórico da pesquisa, perspectivas e manejo com foco em serviços ambientais; Orientador: D.Sc. Antonio Carlos da Gama-Rodrigues; Coorientadora: D.Sc. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues.

O fósforo (P) é essencial para o metabolismo vegetal, principalmente na produção de energia via ATP. Originado do intemperismo mineral, é usado em fertilizantes, mas sua baixa mobilidade no solo exige grandes quantidades para nutrição adequada das plantas. Sua escassez e o risco de contaminação pelo excesso de fertilizantes levantam preocupações sobre a sustentabilidade. A disponibilidade do P no solo é fundamental para a produtividade agrícola e a conservação ambiental. No entanto, o uso intensivo de fertilizantes fosfatados e a preocupação com a sustentabilidade desses recursos finitos têm destacado a necessidade de compreender melhor a dinâmica do fósforo orgânico ( $P_o$ ) nos solos. Assim, este trabalho buscou investigar a dinâmica do  $P_o$  nos solos brasileiros, abordando sua importância como nutriente essencial para o crescimento das plantas e sua influência em diferentes contextos, como textura do solo, uso da terra e classes do solo. Assim, foi realizada (i) uma revisão sistemática sobre o  $P_o$  em solos brasileiros, onde foram avaliados estudos que investigaram os teores de  $P_o$  em diferentes tipos de solo em

todas as macrorregiões do Brasil, considerando fatores climáticos e edáficos e, (ii) uma metanálise para averiguar se o manejo do solo com a implantação de florestas plantadas contribui para o aumento dos teores de  $P_0$  nos solos brasileiros, considerando diferentes classes e texturas de solo, e para isso foram analisados dados de estudos que compararam os teores de  $P_0$  em sistemas florestais (especificamente florestas plantadas) com outros usos da terra, como mata e pastagem, em diversas classes de solo. Foram aceitas as hipóteses testadas de que (i) solos com maiores teores de argila apresentem maiores teores de fósforo orgânico devido à capacidade da argila de adsorver e reter compostos orgânicos, (ii) as Florestas Plantadas aumentam o teor de  $P_0$  no solo por seu maior aporte vegetal, (iii) solos mais intemperizados apresentam maior reserva de  $P_0$  e, (iv) o método de extração de  $P_0$  proposto por Bowman e Moir (1993) é mais indicado para solos mais antigos, e conseqüentemente, mais susceptíveis ao intemperismo. Concluiu-se que quanto mais alto o teor de argila, mais altos serão os teores de  $P_0$ , e que as Florestas Plantadas apresentam os maiores teores médios de  $P_0$ , aproximando-se dos sistemas de uso da terra com *inputs* de adubos químicos, como os sistemas convencionais. A metanálise demonstrou um aumento no  $P_0$  do solo com florestas plantadas no Brasil. Além disso, exceto em solos com material de origem rico em material orgânico, os Latossolos e Argissolos apresentaram proporções percentuais de  $P_0$  maiores do que classes menos intemperizadas. O método de extração de  $P_0$  proposto por Bowman e Moir (1993) mostrou-se eficiente na extração do  $P_0$  em solos brasileiros, com teores próximos ao método de Hedley. Foi observada também a influência dos fatores climáticos sobre a dinâmica do  $P_0$  nos solos brasileiros, através das correlações entre eles podendo concluir que locais com maiores latitudes podem influenciar a atividade biológica e os processos de decomposição, afetando a disponibilidade de fósforo orgânico no solo.

## RESUMO GRÁFICO



## ABSTRACT

ALVARENGA, Laís Chierici Bernardes Rinaldi; D.Sc., North Fluminense State University Darcy Ribeiro; August, 2022; Organic phosphorus in Brazilian soils: a history of research, perspectives and management of organic phosphorus to environmental services; Advisor: D.Sc. Antonio Carlos da Gama-Rodrigues; Co-Advisor: D.Sc. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues.

Phosphorus (P) is essential for plant metabolism, primarily in ATP energy production. Originating from mineral weathering, it is used in fertilizers, but its low mobility in soil requires large quantities for proper plant nutrition. Its scarcity and the risk of contamination from excessive fertilizers raise concerns about sustainability. Soil phosphorus availability is crucial for agricultural productivity and environmental conservation. However, intensive use of phosphate fertilizers and concerns about the sustainability of these finite resources have underscored the need to better understand the dynamics of organic phosphorus ( $P_o$ ) in soils. Thus, this study aimed to investigate  $P_o$  dynamics in Brazilian soils, addressing its importance as an essential nutrient for plant growth and its influence in different contexts, such as soil texture, land use, and soil classes. Therefore, (i) a systematic review of  $P_o$  in Brazilian soils was conducted, evaluating studies investigating  $P_o$  levels in different soil types across all Brazilian regions, considering climatic and edaphic factors, and (ii) a meta-analysis to determine if soil management with planted forests contributes to increased  $P_o$  levels in Brazilian soils, considering different soil classes and textures. Data from studies comparing  $P_o$  levels in forest systems (specifically planted forests) with other land uses, such as forest and pasture, in various soil classes were analyzed. Hypotheses tested were accepted, indicating that (i) soils with higher clay content have higher organic

phosphorus levels due to clay's ability to adsorb and retain organic compounds, (ii) Planted Forests increase soil  $P_o$  content due to their greater vegetative input, (iii) more weathered soils have higher  $P_o$  reserves, and (iv) the  $P_o$  extraction method proposed by Bowman and Moir (1993) is more suitable for older soils, consequently more susceptible to weathering. It was concluded that higher clay content corresponds to higher  $P_o$  levels and that Planted Forests exhibit the highest average  $P_o$  levels, approaching land use systems with chemical fertilizer inputs, such as conventional systems. The meta-analysis demonstrated an increase in soil  $P_o$  with planted forests in Brazil. Additionally, except in soils with organic-rich parent material, Latosols and Ultisols showed higher  $P_o$  percentages than less weathered classes. The  $P_o$  extraction method proposed by Bowman and Moir (1993) proved efficient in extracting  $P_o$  in Brazilian soils, with levels similar to the Hedley method. The influence of climatic factors on  $P_o$  dynamics in Brazilian soils was also observed, with correlations suggesting that higher latitudes may affect biological activity and decomposition processes, thereby affecting organic phosphorus availability in soil.

## 1. INTRODUÇÃO

O Fósforo (P) é um dos macronutrientes vitais para manter um sistema produtivo, auxiliando em processos do desenvolvimento das plantas como divisão celular, componente estrutural como ácidos nucleicos (DNA e RNA) e fosfolipídios, que compõem as membranas celulares, transferência e armazenamento de energia na forma de adenosina trifosfato (ATP) e crescimento vegetal (Mabagala e Mng'ong'o, 2022; Tian et al., 2022).

A limitação dos recursos naturais fosfatados faz com que o mesmo deva ser utilizado da maneira mais eficiente possível (Freiling et al., 2022). Porém, não é o que ocorre. Vêm-se os fosfatos inorgânicos sendo utilizados de forma indiscriminada, haja vista que grande parte do que é adicionado ao solo fica retido e indisponível às plantas através da adsorção específica, sendo, portanto, necessárias aplicações superiores às requeridas pelas plantas para que assim, após adsorção, o solo ainda funcione como fonte de P para a cultura (Sattari et al., 2012; Richardson et al., 2011; Novais e Smyth, 1999).

No solo, o P pode ser encontrado em diferentes formas e labilidades. O P prontamente disponível representa uma menor fração do elemento no solo enquanto o P não prontamente disponível pode representar até 95% do P total dos solos (Condon et al., 2005; Hou et al., 2018). Assim, esses reservatórios de P, em longo prazo, podem regular a disponibilidade de P através da ciclagem de nutrientes por processos biogeoquímicos (mineralização, dessorção e dissolução) (Novais e Smyth, 1999; Frossard et al., 2000).

A dinâmica do P no solo relaciona-se com fatores ambientais os quais alteram os teores de P disponíveis ou não no solo (Santos et al., 2008). Assim, as classes de solos que estão associadas a diferentes graus de intemperismos, bem como fatores climáticos (i.e. temperatura, altitude, latitude, pluviosidade) podem interferir nas concentrações das frações de P presentes nos solos. Por isso, as frações de P são dependentes das características físico-químicas (i.e., textura, matéria orgânica), processos biogeoquímicos (i.e., atividade biológica, intemperismo), composição mineralógica e usos da terra (com diferentes materiais vegetais), que possibilitam a transferência de P entre os compartimentos do solo, funcionando como fonte ou dreno do nutriente (Walker e Syers, 1976; Novais e Smyth, 1999; Santos et al., 2008).

A preocupação com a disponibilidade do P no solo aumenta com o passar dos anos, principalmente em solos como os encontrados no Brasil, fortemente intemperizados, devido à sua alta capacidade de adsorção, tornando indisponível o nutriente como fonte no solo. Somando sua indisponibilidade à chamada crise do P (Sattari et al., 2012), leva-se em consideração a redução dos fertilizantes em virtude da limitação de sua matéria-prima, resultando em um aumento da escassez e, conseqüentemente, problemas generalizados em relação à produtividade agrícola e redução de fontes alimentícias primárias. Assim, a necessidade de entender o ciclo do fósforo, em especial a fração orgânica, torna-se urgente a fim de solucionar os desafios na compreensão dos grandes reservatórios de fósforo orgânico que existem no solo como serviço ecossistêmico, propiciando uma redução no uso de fertilizantes inorgânicos (Gama-Rodrigues et al., 2014) e, conseqüentemente, a elevada saturação do elemento adsorvido ao solo, além da busca por possíveis métodos de conservação de P tanto na agricultura como na economia.

O P no solo é amplamente estudado na ciência do solo por meio de artigos científicos que abordam sua dinâmica em aspectos regionais específicos. Outra gama de revisões bibliográficas é vista compilando o conhecimento e ampliando a discussão sobre as diferentes formas e mecanismos do P no solo relacionado à sua disponibilidade. Porém, uma abordagem de revisão sistemática combinada com a metanálise é pouco observada no ramo agrônomo e ambiental. Este método de apresentação possibilita obter uma contribuição científica e quantitativa, compilando e sintetizando conclusões já exploradas a fim de se obter novas respostas, ajustando resultados iniciais de diferentes pesquisas (Cogo, 2020).

Assim, há um baixo número de trabalhos de revisão com uma abordagem sistemática e meta-analítica na área da ciência do solo, principalmente abordando a dinâmica do P orgânico ( $P_o$ ) em solos tropicais, como os brasileiros. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi compreender a dinâmica do  $P_o$  em diferentes classes de solo, condições edáficas e usos da terra no Brasil, bem como obter um possível indicador de manejo que seja mais adequado, visando a sustentabilidade do ecossistema vegetal, minimizando problemas ambientais e reduzindo os custos para o produtor rural. Para isso, o trabalho foi dividido em dois artigos: (1) uma revisão sistemática com o objetivo de conhecer o comportamento do  $P_o$  em solos no Brasil e (2) avaliar por meio da metanálise se sistemas de Florestas Plantadas aumentam os teores de  $P_o$  nos solos do Brasil, por se tratar de um manejo conservacionista do solo.



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### Fósforo no solo e suas Formas

O fósforo (P) é um elemento de grande relevância para a manutenção de um sistema agrícola sendo ele um macronutriente, essencial às culturas, e exigido em considerável quantidade pelas plantas (Cade-Menun et al., 2018). Na planta, o P exerce funções vitais como crescimento, formação de sementes e desenvolvimento radicular, e ainda atua no interior das células no armazenamento de energia na configuração de ATP, na ativação de proteínas e regulação de processos metabólicos (IPNI, 2011; George, et al., 2018).

A disponibilidade do P no solo está interligada a diversos fatores, como a presença de óxidos de Fe e Al que propiciam a adsorção específica (Novais e Smyth, 1999), o pH do solo (Eriksson et al., 2016) e a mineralização do P orgânico (P<sub>o</sub>) (Fox et al., 2011; Duda et al., 2013). Por razões como estas, alguns pesquisadores consideram o P como o nutriente com biodisponibilidade mais limitada em solos (Vance et al. 2003; Menezes-Blackburn et al., 2018). Em geral, de 20% a 30% do P via fertilizante aplicado ao solo é absorvido pela cultura em solos tropicais, levando a um aumento excessivo na quantidade necessária de fertilizante a ser utilizado (Pereira, 2009).

A forma encontrada por produtores para manter a produtividade dos sistemas agrícolas é fazendo uso de fontes de P advindas de fertilizantes. O Brasil ocupa a quarta posição no *ranking* mundial de consumo de fertilizantes, com o uso de 6% de todo o fertilizante utilizado no mundo (Cella e Rossi, 2010; Fundação Heinrich Böll,

2018). De acordo com a empresa Mosaic Fertilizantes, que atua no setor de produção e comercialização de fertilizantes, o crescimento médio do setor de fertilizantes no Brasil fica entre 2% e 3% ao ano. Com o uso em excesso a fim de superar os processos de fixação no P e conseguir adquirir níveis considerados adequados para o desenvolvimento das plantas (Menezes-Blackburn et al., 2018), o uso indiscriminado de fertilizantes acarreta em uma elevada saturação do elemento adsorvido ao solo (Hooda et al., 2001).

No solo, o P pode ser encontrado em duas grandes formas, orgânica e inorgânica, na qual apresentam ampla variação. O P inorgânico é advindo principalmente de fertilizantes químicos ou, em solos ainda pouco intemperizados, da liberação de rochas fosfatadas via processo lento (Parfitt et al., 2008; Bhattacharya, 2019). O P orgânico, na maioria das vezes, aparece excedendo a forma inorgânica (5% a 95%) (Haygarth et al., 2018). Isto corrobora com a necessidade de se estudar e compreender o P<sub>o</sub> como potencial contribuidor da fertilidade do solo (Costa et al., 2016; Aleixo et al., 2016; Rinaldi, 2018).

O P<sub>o</sub> presente no solo é fruto da imobilização do ortofosfato por plantas e microrganismos produzindo moléculas orgânicas como DNA, hexafosfato de inositol, fosfolipídeos e ATP, depositados ao solo (Richardson et al., 2005; Pereira, 2009), e também de resíduos animais e de plantas, sendo estas as principais fontes de P<sub>o</sub> nos solos (Bhattacharya, 2019), como se pode observar na figura 1.

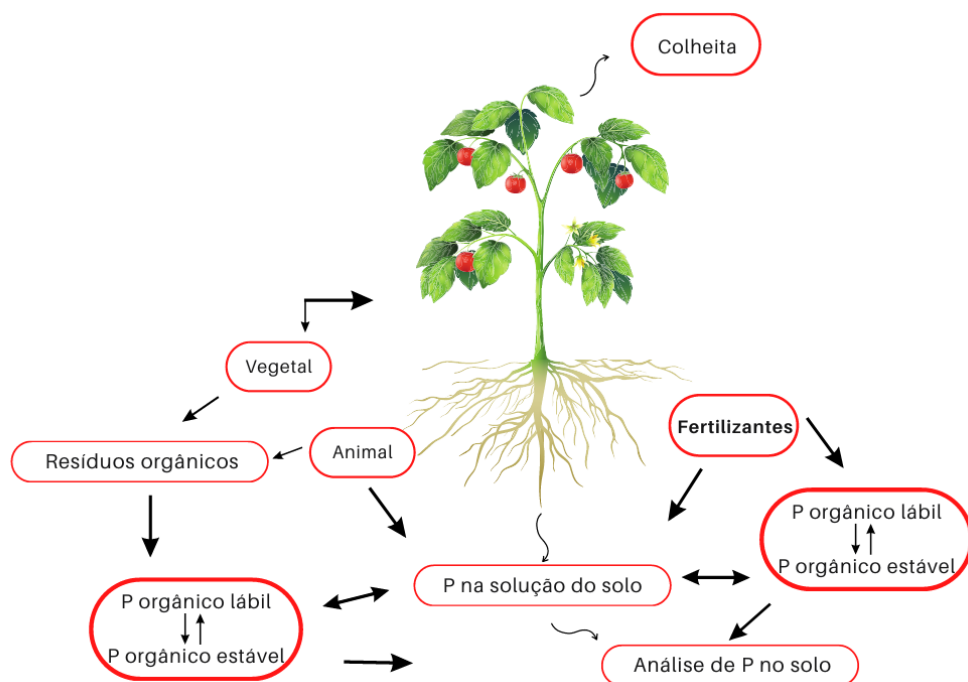


Figura 1. Comportamento do Fósforo no sistema Solo-Planta. Adaptado de Bhattacharya (2019).

O uso do  $P_0$  como fonte de nutrientes às plantas representa um serviço ambiental auxiliando na redução da utilização de insumos agrícolas e, conseqüentemente, na diminuição dos custos de produção através de um manejo considerado sustentável em que haja aumento da matéria orgânica no solo para que, via mineralização dos fosfatos associados à matéria orgânica, seja possível manter a produtividade das culturas (Lang et al., 2016).

#### Caracterização do P orgânico no solo - Métodos de determinação

Diferentes técnicas podem ser aplicadas na quantificação do  $P_0$  presente no solo. Considerada a mais qualificada técnica para a determinação da fração orgânica do P no solo, a espectroscopia de ressonância magnética nuclear de  $^{31}\text{P}$  ( $^{31}\text{P}$ -RMN) é conhecida como uma técnica que permite a identificação de formas químicas sem destruir e sem ser invasiva em relação à amostra utilizada (Feng et al., 2018; Aleixo et al., 2019). A amostra pode ser analisada tanto em estado sólido ou líquido, porém com enfoques diferentes. Quando em estado líquido, a principal funcionalidade é na identificação de compostos orgânicos presentes na amostra e, quando em estado sólido, tem seu foco voltado aos compostos inorgânicos de P presentes no material (Turner et al., 2005; Abdi et al., 2014).

Em adição a esta técnica, a associação com outros métodos, como o fracionamento proposto por Hedley et al. (1982), tem grande relevância. A metodologia proposta por Hedley et al. (1982) é o fracionamento mais usual (Aleixo, 2018) e consiste na obtenção de nove diferentes frações de P no solo (separadas em três grupos: frações inorgânicas, orgânicas e fração residual) através do fracionamento sequencial utilizando extratores com diferentes forças de extração, possibilitando além de sua quantificação a separação dos *pools* de P por meio de sua labilidade.

Também há o fracionamento proposto por Bowman e Cole (1976) como forma de extração do  $P_0$  no solo onde se fraciona elemento em quatro partes, sendo possível a obtenção dos teores de  $P_0$  da fração lábil, moderadamente lábil, moderadamente resistente e altamente resistente.

Outro método que permite a quantificação da fração orgânica no solo é a metodologia proposta por Bowman e Moir (1993), que consiste na extração do P em meio básico, NaOH, com a adição do EDTA (etilenodiamina). Este composto favorece a complexação dos íons paramagnéticos de Ferro e Alumínio, tendo a função de quelante de metais catiônicos, propiciando o aumento da eficiência da extração (Bowman e Moir, 1993, Rinaldi, 2018).

Bowman, em 1989 já havia proposto uma metodologia que consistia na solubilização das substâncias orgânicas através da adição de ácido e, posteriormente, meio básico (Oliveira et al., 2014), obtendo-se frações orgânicas e inorgânicas de P.

Pesquisas com relação ao melhor método de extração de P vêm sendo realizadas. Rinaldi (2018), ao comparar o fracionamento de Hedley, a metodologia de Bowman (1889) e a extração com NaOH+EDTA, encontrou efeitos que demonstram os melhores resultados de extração advindos deste último método, onde obteve-se resultados semelhantes estatisticamente ao fracionamento de Hedley. Entretanto, a extração com NaOH+EDTA é mais fácil e rápida de ser reproduzida, além de se obter um menor erro dado o menor número de passos a serem executados.

Ainda assim, é importante ressaltar que apesar dos pontos positivos existentes nos métodos de extração de P no solo, ainda há pontos que necessitam de melhorias. George et al. (2018) relataram as fraquezas presentes nas metodologias, destacando as limitações metodológicas e a inexistência de um padrão dado à grande heterogeneidade dos nossos solos, precisando assim de estudos que propiciem a padronização da metodologia.

## Transformações e Compostos de P orgânico no Solo

As transformações do P orgânico e inorgânico nos solos são associadas a processos físico-químicos, biológicos e bioquímicos como: adsorção/dessorção; precipitação/dissolução e mineralização/imobilização (Bunemann, 2018). A avaliação da fosfatase alcalina e ácida, a fosfodiesterase e a fitase são formas de se monitorar essas transformações (Cade-Menum, 2005).

Segundo Nash et al. (2014) as diferentes formas de P<sub>o</sub> encontradas em sítios que recebem manejo igual ou similar são resultantes de uma diferente taxa de mineralização, sugerindo assim, que existe a possibilidade de se utilizar esta taxa com o intuito de regular a liberação de P acessível para as culturas. Estudos demonstram

que as transformações e compostos de P nos solos através da fração orgânica é manipulada pelo tipo de vegetação durante a pedogênese (Turner et al., 2007; Gao et al., 2019).

Em um estudo avaliando as transformações de  $P_o$  no solo em uma cronosequência, Turner et al. (2007) encontraram grandes diferenças nos compostos de  $P_o$  ao longo do tempo. Os autores levantaram algumas hipóteses para justificar esta diferenciação: (1) pedogênese, (2) mudanças no potencial de estabilização do fósforo, (3) mudanças nos insumos de fósforo e (4) diferenças na utilização biológica dos vários compostos.

É possível conhecer as diferentes espécies de  $P_o$  presente nas amostras de solo por meio da  $^{31}P$ -RMN que consistem, em sua maioria, nas formas monoéster, diéster e fosfonatos e, ainda, compostos degradados como  $\alpha$ -Glicerofosfato,  $\beta$ -Glicerofosfato e Mononucleotídeos (Aleixo, 2018; Rinaldi, 2018, Cade-Menun et al., 2018; Wei et al., 2019). A região monoéster é composta por Myo-inositol e esteroisômeros como scyllo-IHP e chiro-IHP. Apesar de presente em plantas e células microbianas, as concentrações de DNA e RNA encontradas nos solos são relativamente pequenas e isso se justifica pela sua maior labilidade. A região monoéster representa a maior porção de P orgânico no solo oriundo de sua alta recalitrância nos solos (Darch et al., 2014).

Na cronosequência estudada por Turner et al. (2007) acredita-se que a matéria orgânica não exerça a influência mais significativa sobre a principal forma de P monoéster, os (hexa) fosfatos de inositol, e sim a pedogênese, propondo que sua estabilização seja fruto da ligação com óxidos metálicos de ferro e alumínio. Em relação ao ortofosfato diéster, DNA, presume-se que sua estabilização tenha ligação com a matéria orgânica estável no solo. Da mesma forma avalia-se a estabilização do pirofosfato, associado à matéria orgânica do solo.

Outros autores (Darch et al., 2014) sugerem que as espécies de pirofosfatos (inorgânico) e DNA (ortofosfato diéster) são formas comparativamente lábeis e possivelmente de degradação mais rápida, que está associada à sua resistente sorção no solo, o que impede a inviabilização da hidrólise.

Os *pools* de P no solo tendem a buscar um equilíbrio, porém esta relação se dificulta por fatores como mudanças climáticas e condições edáficas. Desta forma, a relação entre os *pools* orgânicos e inorgânicos do solo se aproxima de 3,0:0,1 em função da pedogênese do solo e seu teor de matéria orgânica (Weihrauch and Opp.,

2018). Assim, conhecer a interação entre os fatores climáticos e edáficos é essencial para correlacioná-los com os *pools* de P presentes no solo.

#### Relação entre a influência do uso da terra e os reservatórios de P orgânico no solo

O estoque de  $P_o$  nos solos vem sendo estudado associado a um manejo que propicie sua utilização como fonte e sustento da produção, reduzindo os insumos agrícolas (George et al., 2018; Nash et al. 2014). Rocha et al. (2019), avaliando os impactos da intensidade de colheita de madeira e aplicação de fertilizantes de P, concluíram que as práticas de manejo que favorecem o incremento de matéria orgânica no solo proporcionam um aumento na fração de P disponível no solo, reduzindo a fração não lábil do nutriente.

Gama-Rodrigues et al. (2018) relataram um aumento nas concentrações de P no solo como resultante da ciclagem e acumulação do P orgânico advindos de leguminosas florestais.

Avaliando a fertilidade do solo e frações de fósforo em um Chernossolo a longo prazo, Milić et al. (2019) concluíram que a utilização de adubo orgânico (esterco) aumenta os *pools* de P no solo e, conseqüentemente, melhora sua fertilidade.

Outra visão importante no uso da terra é em solos ricos em carbonatos, pois o  $Ca^{2+}$  precipitam o P do solo ocasionados pelo alto pH. Ahamad et al. (2018) estudaram o efeito do tempo na utilização de fertilizantes orgânicos e inorgânicos de P em solo arenoso carbonático e concluíram que o uso conjunto das duas formas de adubo é importante para manter a produtividade da cultura, pois a utilização da fonte orgânica de adubo acarretou em uma competição entre os íons de P precipitados e propiciou, assim, a liberação de P para a solução do solo.

Pode-se inferir com isto a relevância do uso da terra no contexto ambiental com o intuito de reaver um ecossistema sustentável, antes degradado, utilizando-se de um manejo eficiente, onde se visa a ciclagem de P nos solos, principalmente aqueles fortemente intemperizados, como os encontrados no Brasil (Aleixo, 2018).

## O Futuro do P: Perspectivas para o P orgânico presente no solo associado a serviços ambientais

Segundo Bunemann (2015), a única maneira de se adquirir um manejo eficiente no uso do P no solo é através da total compreensão dos *pools* e do ciclo biogeoquímico na relação solo-planta. Assim, a intensa procura por métodos que avaliem de forma exata o teor de P existente no solo ainda é um obstáculo dado à grande diversidade mundial, tanto em solo quanto em coberturas vegetais (Gatiboni et al., 2013).

Ainda em relação às metodologias usadas na quantificação do P no solo, Condrón e Newman (2011) citam cinco importantes pontos relevantes no que se refere à eficiência dos métodos na extração do P inorgânico e orgânico, sendo elas: (1) Precipitação de ácidos húmicos; (2) Hidrólise ácida do P orgânico; (3) Presença de pirofosfatos e polifosfatos; (4) Complexação do P inorgânico e (5) Incompleta extração do P.

Em uma revisão sobre o P orgânico nos solos, George et al. (2018) indagaram sobre algumas questões potenciais para contribuir com futuras pesquisas na elucidação do ciclo do P orgânico e sua possível contribuição na solução de problemas ambientais, e concluíram que o futuro nas pesquisas de P orgânico no solo devem estar associadas a avanços em procedimentos analíticos, compreensão da interação do P com outros elementos presentes nos solos, suas interações com o uso da terra, a compreensão da dinâmica do P orgânico microbiano, suas interações com nanopartículas e o uso de um modelo matemático de equações estruturais do P orgânico.

Além destes fatores, a compreensão destas transformações e as correlações que comandam as taxas de mineralização do P no solo são fundamentais para transformar o  $P_o$  como potencial fonte de nutrientes para a planta (Nash et al., 2014). Desta forma, pode-se concluir que ainda existem muitas questões a serem desvendadas em relação ao  $P_o$  no solo. Neste sentido, a relação com a questão ambiental assume cada vez mais um papel de relevância, visto que os recursos relacionados ao elemento são finitos e a elucidação da dinâmica do P pode propiciar um manejo do solo à serviços ecossistêmicos.

## Revisão Sistemática e Metanálise na Ciência do Solo

Uma revisão sistemática é um estudo secundário que se diferencia de uma revisão bibliográfica ou de literatura por possuírem técnicas quantitativas, enquanto as narrativas apresentam uma história, uma discussão acerca de um determinado assunto (Cogo, 2022; Pocinho, 2008). A revisão sistemática ganha importância num contexto em que trabalhos isolados não excluem, com certeza, as diferenças entre tratamentos e ambiente de estudo, bem como, erros amostrais ou vieses de pesquisa (Brasil, 2012).

Revisão sistemática é uma forma de se trabalhar sintetizando, avaliando e interpretando pesquisas disponíveis sobre uma área de interesse ou questão particular (Brasil, 2012). Além disso, a revisão sistemática engloba uma revisão bibliográfica abrangente, imparcial e reprodutível (Higgins e Green, 2009). A síntese de uma revisão sistemática é obtida por meio de uma análise quantitativa deste estudo do conjunto de trabalhos, chamada de Metanálise (Clarke, 2001; Cook et al. 1995).

São fundamentais que se cumpram alguns critérios para a realização de uma revisão sistemática como: a definição de questões de pesquisa bem estruturada; definir os critérios para inclusão ou exclusão de um trabalho; uma ampla busca na literatura; selecionar os artigos e extrair os dados de interesse; e por último, sintetizar os dados e redigi-los de modo que possam ser reproduzidos (Galvão e Pereira., 2014).

Como mencionado, a metanálise é a técnica mais utilizada para sintetizar os dados provenientes de uma revisão bibliográfica. Por essa técnica, é possível combinar resultados de diferentes estudos gerando as estimativas metanalíticas (Rodrigues e Ziegelmann, 2010). Os primeiros estudos tentando sumarizar resultados de diferentes estudos foram feitos por Karl Pearson em 1904 (Cogo, 2020). Sua justificativa é, até hoje, o direcional para as metanálise produzidas na qual ele imputava a não confiabilidade dos pequenos estudos, assumindo um grande tamanho de erro (Rodrigues e Ziegelmann, 2010).

Posterior a Pearson, em 1904 e 1931, outros estatísticos como Tippet e Fisher, em 1932, trouxeram essa combinação de trabalhos com métodos conhecidos como as correlações de valores de *p*. Yates e Cochran, em 1938, usaram a combinação de estimativas. *A posteriori*, o método de trabalho foi sendo empregado em outras áreas da ciência, como saúde, agrárias, social e educacional. Porém, o termo metanálise só



passou a ser utilizado em 1977 pelo psicólogo Gene Glass (Yates e Cochran, 1938; Glass, 1976; Whitehead, 2002; Cogo, 2020).

Historicamente, a metanálise é amplamente utilizada por profissionais da saúde desde 1980, quando passou a ser amplamente empregada (Whitehead., 2002). Mesmo após 50 anos de aplicação, na agricultura ainda são poucos os trabalhos encontrados com essa metodologia. Cogo (2020) realizou uma pesquisa com os termos metanálise vs. agricultura, em português e inglês, e encontrou um total de 2.118 artigos, dos quais apenas nove foram produzidos no Brasil. Portanto, é de grande relevância que a metanálise seja mais discutida e explicada para que futuros pesquisadores a reproduzam.

### Metanálise: Como utilizar o método?

Para a realização de uma metanálise, inicialmente é necessário que se passe pelos passos anteriormente mencionados na confecção de uma revisão sistemática, ou seja, é necessário que se tenha a pergunta a ser respondida pelo estudo em questão, uma busca completa pelos trabalhos acerca do assunto discutido, uma triagem e elegibilidade dos estudos e extração dos dados dos trabalhos incluídos na revisão sistemática (Moher et al., 2009; Cogo, 2020). Daí se pode conduzir a metanálise (Figura 2).



Figura 2. Síntese dos passos para uma revisão sistemática e metanálise.

A natureza dos dados selecionados na revisão sistemática vem de diferentes estudos, mas a metanálise permite trabalhar com uma padronização das medidas vindas desses estudos. Assim, é dado o tamanho do efeito calculado.

O tamanho do efeito de um estudo pode ser oriundo de um grupo ou dois. Para um grupo temos as medidas de efeito *odds* e a incidência (Rodrigues, 2010). Para comparação de dois grupos, os dados podem ser oriundos de variáveis binárias, mais comuns, ou variáveis contáveis (HtAnalyze, 2022). Para as variáveis binárias têm-se as medidas de efeito calculadas como *odds ratio*, risco relativo, redução absoluta de risco e número necessário para tratar. Já para as variáveis contínuas, utilizam-se as média e desvio-padrão para obtenção das medidas de efeito, que podem ser a diferença absoluta da média ou a diferença padronizada entre as médias (Roever, 2016; Rodrigues, 2010) (Tabela 1).

Tabela 1. Utilização e tipos de medidas de efeito

<i>Odds</i>	Razão entre a probabilidade de o evento ocorrer e a probabilidade de o evento não ocorrer.
Incidência	O número de novos casos surgidos em uma determinada população e um determinado intervalo de tempo.
<i>Odds Ratio</i>	Quantas vezes o <i>odds</i> de um grupo equivale ao <i>odds</i> do outro grupo.
Risco Relativo	Razão entre a probabilidade de o evento ocorrer no grupo 1 e a probabilidade de o evento ocorrer no grupo 2.
Redução Absoluta de Risco	Diferença entre as probabilidades de ocorrer o evento nos dois grupos.
Diferença Absoluta entre Médias	Diferença absoluta entre as médias quantifica a diferença entre a média do grupo 1 e a média do grupo 2.
Diferença padronizada entre médias	Média padronizada entre as médias quantifica a diferença entre a média do grupo 1 e a média do grupo 2.

Adaptado de Roever, 2016.

Após a definição da medida de efeito, é necessário identificar qual o modelo de efeito que se enquadra aos dados a serem estudados. Os modelos podem ser fixos

quando o efeito de interesse é o mesmo em todos os estudos ou aleatórios quando o efeito de interesse não é igual em todos os estudos (Cogo, 2020).

Para se escolher em qual modelo os dados se enquadram, é necessário que se avalie a heterogeneidade dos estudos. Essa heterogeneidade pode ser avaliada, na metanálise, pelo teste  $Q$  de Cochran ou pelo  $I^2$  de Higgins e Thompson. Quando os dados são heterogêneos pode-se dizer que há uma variabilidade não aleatória (Rodrigues, 2010). O modelo de  $I^2$  é considerado a forma mais direta para verificar a heterogeneidade e sua escala varia de 0 a 100% onde 0% indica a homogeneidade dos dados, próximo a 25% a baixa heterogeneidade, próximo a 50% a moderada heterogeneidade e próximo de 75% a alta heterogeneidade (Higgins et al. 2003).

E por último é realizado a análise de *Forest Plot* onde se tem uma representação gráfica da metanálise (Figura 3).

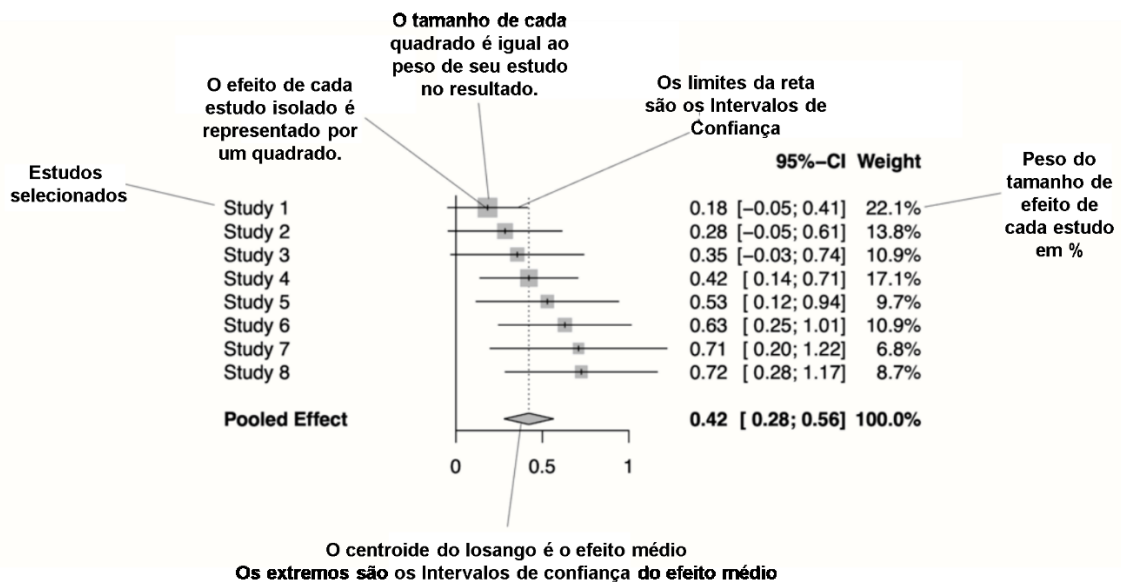


Figura 3. Elementos de um Forest Plot. (Adaptado de Harrer et al., 2021).

A primeira coluna do *Forest Plot* (Figura 3) é usualmente acompanhada de uma segunda e terceira coluna na qual contém o desvio-padrão, média e  $n$  amostral de cada grupo de estudo, tornando assim possível a reprodução dos resultados por qualquer pesquisa (Harrer et al., 2021). Assim, tem-se um resumo gráfico abrangente dos resultados obtidos na metanálise que podem ser facilmente compreendidos pelo leitor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdi D, Cade-Menun BJ, Ziadi N, Parent LÉ. (2014) *Long-term impact of tillage practices and phosphorus fertilization on soil phosphorus forms as determined by  $p$  nuclear magnetic resonance spectroscopy*. J Environ Qual. 43(4):1431-41.
- Ahmad, M., Ahmad, M., El-Naggar, A. H., Usman, A. R. A., Abduljabbar, A., Vithanage, M., ... Al-Wabel, M. I. (2017). *Aging effect of organic and inorganic fertilizers on phosphorus fractionation in a calcareous sandy loam soil*. Pedosphere. Volume 28, Issue 6, Pages 873-883.
- Aleixo, S. (2018) *Especiação e transformações do fósforo orgânico em solos florestais e agroflorestais na região da mata atlântica no Brasil*. Tese (Doutorado), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ. p. 105.
- Aleixo, S.; Gama-Rodrigues, A. C.; Costa, M. G.; Sales, M. V. S.; Gama-Rodrigues, E. F.; Marques, J. R. B. (2016) *P transformations in cacao agroforests soils in the Atlantic forest region of Bahia, Brazil*. Agroforest Syst. DOI 10.1007/s10457-016-9939-6.
- 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*. Volume 17, e00220.
- Alvarez V., V. H., Ribeiro, A. C. (1999). *Calagem*. In A. C. Ribeiro, P. T. G. Guimarães, V. H. Alvarez V. (Eds.), *Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais* (5 ed., pp. 43-60).
- Bhattacharya, A. (2019). *Changing Environmental Condition and Phosphorus-Use Efficiency in Plants*. *Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants*, 241–305.

- Bowman, R. A. (1989) *A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and dilute base for soil organic phosphorus*. *Soil Science Society of America Journal*, 53(2), 362-366.
- Bowman, R. A., Cole, C. V. (1978) *Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by  $\text{NaHCO}_3$  extraction*. *Soil Science*, 125(1), 49-54.
- Bowman, R. A., Moir, J. O. (1993) *Basic EDTA as an extractant for soil organic phosphorus*. *Soil Science Society of America Journal*, 57(6), 1516-1518.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., ... Brussaard, L. (2018). *Soil quality – A critical review*. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125.
- Bünemann, E.K. (2015) *Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus e A review*. *Soil Biology & Biochemistry*. 89:82-98.
- Cade-Menun, B. J. (2005) *Characterizing phosphorus in environmental and agricultural samples by  $^{31}\text{P}$  nuclear magnetic resonance spectroscopy*. Geological and Environmental Sciences Department, Building 320, Room 118, Stanford University, Stanford, CA 94305-2115, USA.
- Cade-Menun, B.J.; Elkin, K.R.; Liu, C.W.; Bryant, R.B.; Kleinman, P.J.A.; Moore, P.A.Jr. (2018) *Characterizing the phosphorus forms extracted from soil by the Mehlich III soil test*. *Geochem Trans.* 19:7
- Cella, D.; Rossi, M.C.L. (2010) *Análise do mercado de fertilizantes no Brasil*. *Interface Tecnológica - v.7 - n.1*.
- Cogo, F. D. (Org.). (2020). *Introdução à revisão sistemática e meta-análise aplicadas à agricultura* [recurso eletrônico]. Belo Horizonte: Ed. UEMG.
- Condon L.M., Newman S. (2011) *Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils*. *Soils Sediments* 11:830–840.
- Costa MG, Gama-Rodrigues AC, Gonçalves JLDM, Gama-Rodrigues EF, Sales MVDS, Aleixo S (2016) *Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil*. *Forests* 7(1):15
- Darch, T.; Blackwell, M.S.A.; Hawkins, J. M.B.; Haygarth, P. M.; Chadwick, D. (2014) *A meta-analysis of organic and inorganic phosphorus in organic fertilizers, soils and water; implications for water quality*. Taylor & Francis. DOI: 10.1080/10643389.2013.790752.
- Deng, Q.; McMahon, D.E.; Xiang, Y.; Yu, C.; Jackson, R.B.; Hui, D. (2017) *A global meta-analysis of soil phosphorus dynamics after afforestation*. *New Phytologist* 213: 181–192 1

- Dick, W.A., Tabatabai, M.A. (1977) *Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds*. Journal of Environmental Quality, 6, 82-85.
- Duda, G. P.; Guerra, J. G. M.; Pereira, M. G.; Anjos, L. H. C.; Ribeiro, M. R. (2013) *Avaliação da biodisponibilidade de fósforo em diferentes classes de solos do Brasil*. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 34, n. 4, p. 1563-1576.
- Embrapa. (1999). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes* (E. solos Ed.). Brasília - DF, Brasil: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
- Eriksson, A.K.; Hillier, S.; Hesterberg, D.; Klysubun, W.; Ulén, B.; Gustafsson, J.P. (2016). *Evolution of phosphorus speciation with depth in an agricultural soil profile*. Geoderma. 280:29–37.
- Feng, W.; Li, C.; Zhang, C.; Liu, S.; Song, F.; Guo, W.; He, Z.; Li, T.; Chen, H. (2018) *Characterization of phosphorus in algae from a eutrophic lake by solution <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance spectroscopy*. Limnology. Volume 20, Issue 2, pp 163–171.
- Ferreira, E. B.; Cavalcanti, P. P.; Nogueira, D. A. *ExpDes: Experimental designs package*. R package version 1.1.2. 2013. Available at: <<http://cran.r-project.org/web/packages/ExpDes/index.html>>. Access:14 Fev. 2019.
- Figueiredo Filho, D. B.; Paranhos, R.; Silva Júnior, J.A.; Rocha, E.C.; Alves, D.P. (2014) *O que é, para que serve e como se faz uma meta-análise?* Teoria e Pesquisa, v. 23, n. 2, p. 205–228.
- Fox, T. R., Miller, B. W., Rubilar, R., Stape, J. L., & Albaugh, T. J. (2011). Phosphorus Nutrition of Forest Plantations: The Role of Inorganic and Organic Phosphorus. Phosphorus in Action, 317–338.
- Fundação Heinrich Böll. (2018) *Atlas do Agronegócio: fatos e números sobre as corporações que controlam o que comemos*. Casarão Ameno Resedá - Catete, Rio de Janeiro-RJ. p. 1-58.
- Gama-Rodrigues, A. C.; Aleixo, S.; Schripsema, J.; Gama-Rodrigues, E. F. Can leguminous trees increase soil phosphorus availability? A link between the P and N cycles in tropical forests and agroforests of Brazil. In: 21st World Congress of Soil Science, 2018, Rio de Janeiro. 21st World Congress of Soil Science, 2018.
- Gao, X.-L., Li, X. G., Zhao, L., & Kuzyakov, Y. (2019). *Regulation of soil phosphorus cycling in grasslands by shrubs*. Soil Biology and Biochemistry. doi:10.1016/j.soilbio.2019.02.012.
- Gatiboni, L. C., Brunetto, G., Rheinheimer, D. S., Kaminski, J., Pandolfo, C. M., Veiga, M, Flores, A. F. C., Lima, M. A. Silveira., Girotto, E., Copetti, A. C. C.. (2013). *Spectroscopic quantification of soil phosphorus forms by 31p-nmr after nine*

*years of organic or mineral fertilization*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 37(3), 640-648.

- George, T.S., Giles, C.D., Menezes-Blackburn, D., Condon, L.M., Gama-Rodrigues, A.C., Jaisi, D., ... Haygarth, P.M. (2017). *Organic phosphorus in the terrestrial environment: A perspective on the state of the art and future priorities*. Plant and Soil. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3391-x>
- Godinho, T. O.; Caldeira, M. V. W.; Brun, E. J. (2015) *Ciclagem de nutrientes via serapilheira em ecossistemas florestais naturais no Brasil*. Ciências Florestais e Biológicas, p. 13-52.
- Grant, C.A.; Flaten, D.N.; Tomasiewicz, D.J.; Sheppard, S.C. (2011) A Importância do Fósforo no Desenvolvimento Inicial da Planta. Informações Agrônômicas Nº 95.
- Haygarth, P.; Harrison A. F.; Turner, B. L. (2018) On the history and future of soil organic phosphorus research: a critique across three generations: On soil organic phosphorus. European Journal of Soil Science. 69(1) DOI: 10.1111/ejss.12517.
- Hedley M.J, Stewart J.W.B, Chauhan B.S (1982) *Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations*. Soil Sci Soc Am J 46:970–976
- Hooda, P. S., Truesdale, V. W., Edwards, A. C., Withers, P. J. A., Aitken, M. N., Miller, A., & Rendell, A. R. (2001). *Manuring and fertilization effects on phosphorus accumulation in soils and potential environmental implications*. Advances in Environmental Research, 5(1), 13–21.
- Jin Liu, J.; Hu, Y.; Yang, J.; Abdi, D.; Cade-Menun, B.J. (2015) *Investigation of Soil Legacy Phosphorus Transformation in Long-Term Agricultural Fields Using Sequential Fractionation, P K-edge XANES and Solution P NMR Spectroscopy*. Environ. Sci. Technol. 49, 168–176
- Lang, F., Bauhus, J., Frossard, E., George, E., Kaiser, K., Kaupenjohann, M., Krüger, J., Matzner, E., Polle, A., Prietzel, J., (2016). *Phosphorus in forest ecosystems: new insights from an ecosystem nutrition perspective*. J. Plant Nutr. Soil Sci. 179 (2), 129–135.
- Menezes-Blackburn, D., Giles, C., Darch, T. et al. (2018) *Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review*. Plant Soil. 427: 5.
- Milića, S.; Ninkova, J.; Zeremskia, T.; Latković, D.; Šeremešić, S.; Radovanović, V.; Žarković, B. (2019) *Soil fertility and phosphorus fractions in a calcareous chernozem after a long-term field experimente*. Geoderma. Volume 339, Pages 9-19.
- Murphy, J., Riley, J. P. (1962) *A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters*. Analytical Chemistry Acta, 27, 31-36.

- Nasha, D.M.; Haygarth, P.M.; Turner, B.L.; Condrón, L.M.; Dowell Alan, R.W.; Richardson, A.E.; Watkins, M.; Heaven, M.W. (2014) *Using organic phosphorus to sustain pasture productivity: A perspective*. Geoderma. Volumes 221–222, Pages 11-19.
- Novais, R. F.; Smyth, T. J.; Nunes, F. N. (2007) Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed) *Fertilidade do solo*. Viçosa: SBCS. 1017p.
- Novais, R.F., Smyth, T.J. (1999) *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, p.399.
- Oliveira, R. I., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Zaia, F. C., Pereira, M. G., Fontana, A. (2014) *Organic phosphorus in diagnostic surface horizons of different Brazilian soil orders*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 38(5), 1411-1420.
- Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, FAO. (2017) *World fertilizer trends and outlook to 2020*. Roma. 1-38.
- Parfitt, R. L.; Baisden, W. T.; Elliott, A. H. (2008) *Phosphorus inputs and outputs for New Zealand in 2001 at national and regional scales*, Journal of the Royal Society of New Zealand, 38:1, 37-50.
- Pearson K. *Report on certain enteric fever inoculation statistics*. BMJ. 1904 Nov;2(2288):1243-6.
- Pereira, H. S. (2009) Fósforo e potássio exigem manejos diferenciados. visão agrícola. nº9, 43-46 jul/dez.
- R Development Core Team (2009) *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Viena. <http://www.R-project.org>.
- Richardson, A.E.; George, T.S.; Hens, M.; Simpson, R.J. (2005) Utilization of soil organic phosphorus by higher plants. In 'Organic phosphorus in the environment'. (Eds BL Turner, E Frossard, DS Baldwin) pp. 165–184. (CABI: Wallingford, UK)
- Richardson, A. E., & Simpson, R. J. (2011). Soil Microorganisms Mediating Phosphorus Availability Update on Microbial Phosphorus. *Plant Physiology*, 156(3), 989–996. doi:10.1104/pp.111.175448
- Rinaldi, L.C.B. (2018). *Especiação de fósforo em solos com diferentes texturas e cultivados com eucalipto*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 107p.
- Santos, D. R.; Gatiboni, L. C.; Kaminski, J. (2008) *Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto*. Ciência Rural, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, Mar/Abr.



- SIGMAPLOT. 2008. *For windows, version 11.0*. Systat Software, 2008.
- Sattari, S. Z., Bouwman, A. F., Giller, K. E., & van Ittersum, M. K. (2012). Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(16), 6348–6353. doi:10.1073/pnas.1113675109
- Turner, B. L., Cade-Menun, B. J., Condron, L. M., Newmand, S. (2005) *Extraction of soil organic phosphorus*. *Talanta* 66. 294–306.
- Turner, B. L.; Condron, L.M.; Richardson,S.J.; Peltzer, D.A.; Allison, V.J. (2007) *Soil Organic Phosphorus Transformations During Pedogenesis*. *Ecosystems* (2007) 10: 1166–1181.
- Vance, C.P., Uhde-Stone, C., Allan, D.L., (2003). *Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource*. *New Phytol.* 157 (3), 423–447.
- Wei, K.; Chen, Z.; Zhang, X.; Chen, L. (2019) *Phosphorus forms and their distribution under long-term no tillage systems*. *Plant, Soil and Environment*, 65, (1): 35–40.
- Weihrauch, C.; Opp, C. (2018) *Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far*. *Geoderma*. Volume 325, Pages 183-194.
- Yates, F. and Cochran, W.G. (1938) *The Analysis of Groups of Experiments*. *Journal of Agricultural Science*, 28, 556-580. <http://dx.doi.org/10.1017/S0021859600050978>

### 3. TRABALHOS

#### 3.1 FÓSFORO ORGÂNICO NOS SOLOS BRASILEIROS SOB DIFERENTES USOS DA TERRA, CLASSES DE SOLO E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS – UMA SÍNTESE

##### RESUMO

O fósforo (P) é um macronutriente essencial para o metabolismo dos vegetais, estando presente em diversas rotas metabólicas, como no transporte de energia através da adenosina trifosfato (ATP). No solo, o P se origina através do intemperismo de minerais primários, que também são utilizados para a fabricação de fertilizantes fosfatados. Por ser um elemento de pouca mobilidade no solo e altamente adsorvido ao solo, é preciso aplicar altas quantidades de insumos capazes de manter uma produção adequada para as culturas agrônômicas. Os minerais primários que são fontes de P não são renováveis, sendo, portanto, seus estoques limitados. Dessa forma, a incerteza da sustentabilidade desse recurso a longo prazo e aplicações generalizadas de fertilizantes, que podem causar contaminações pelo excesso de P, é preocupante. A necessidade de entender o ciclo do fósforo, em especial a fração orgânica, se torna urgente a fim de solucionar os desafios na compreensão e caracterização dos grandes reservatórios de fósforo orgânico que existem no solo como serviço ambiental, propiciando uma redução no uso de adubos químicos e, conseqüentemente, a elevada saturação do elemento adsorvido ao solo. Além disso,

almeja-se a busca por possíveis métodos de conservação de P, tanto na agricultura para os avanços das produções agrícolas em conjunto com a preservação do meio ambiente, quanto na redução no uso de fertilizantes inorgânicos. Assim, foi realizada uma revisão sistemática acerca do  $P_o$  em solos brasileiros distribuídos em todas as macrorregiões, com um levantamento dos fatores climáticos e edáficos a fim de se verificar a influência dessas variáveis no comportamento e concentrações do  $P_o$  no solo. Foram aceitas as hipóteses testadas de que (i) solos com maiores teores de argila apresentem maiores teores de fósforo orgânico devido à capacidade da argila de adsorver e reter compostos orgânicos, (ii) as Florestas Plantadas aumentam o teor de  $P_o$  no solo por seu maior aporte vegetal, (iii) solos mais intemperizados apresentam maior reserva de  $P_o$  e, (iv) o método de extração de  $P_o$  proposto por Bowman e Moir (1993) é o mais indicado para solos intemperizados. Concluiu-se que, quanto mais alto o teor de argila dos solos, mais altos serão os teores de  $P_o$ , e as Floresta Plantadas apresentaram os maiores teores médios de  $P_o$ , se aproximando de usos da terra com *inputs* de adubos químicos como os sistemas convencionais. Além disso, à exceção de solos com material de origem ricos de material orgânico, os Latossolos e Argissolos apresentaram proporções em percentual de  $P_o$  maiores que classes de solos mais jovens, sendo método de extração de  $P_o$  proposto por Bowman e Moir (1993) como o mais eficiente em extrair o  $P_o$  em solos brasileiros, com teores próximos ao método de Hedley. Ainda foi possível ver a influência dos fatores climáticos sobre a dinâmica do  $P_o$  nos solos brasileiros, por meio das correlações entre eles.

Termos de Indexação: Fósforo Orgânico; Boxplot, Revisão Sistemática.

## INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de clima tropical com uma extensa área territorial e uma alta diversidade de classes de solos. Contudo, essa extensa área é composta predominantemente por Latossolos, que junto com os Argissolos e Neossolos representam 70% do país (Santos et al., 2018). Essa classe é conhecida por seus altos teores de oxi-hidróxidos de Fe e Al, devido ao processo de ferralitização (Santos et al., 2018), com quantidades expressivas cargas positivas, capazes de adsorver

fortemente o fosfato inorgânico incrementado ao solo via fertilização, ou precipitados com cátions de Fe e Al (Novais e Smyth, 1999).

Os fertilizantes fosfatados são oriundos de rochas e minerais fosfatadas, como fosforitas e apatitas, um recurso natural finito (Cooper et al. 2011; Rodrigues et al., 2016). O declínio das reservas fosfatadas vem preocupando o mundo, sobretudo o setor responsável pela produção de alimentos, por sua essencialidade no crescimento e desenvolvimento vegetal, no qual o fósforo (P) participa de processos vitais da planta (i.e., divisão celular, transporte de assimilados, energia e carga genética) (Silva, 2021).

Por isso, é importante entender a dinâmica do P no solo, de modo a favorecer um manejo que utilize de forma mais eficiente o P presente nos solos. No solo, o P pode ser encontrado na forma inorgânica ( $P_i$ ) e orgânica ( $P_o$ ), e esta última pode corresponder a até 95% do P total do solo (Novais e Smyth, 1999)

Não há um padrão definido para avaliar os teores de  $P_o$  nos solos e diferentes metodologias são utilizadas como a extração proposta por Bowman (1989), Bowman e Moir (1993), Hedley et al. (1982), além da técnica de ressonância magnética nuclear, que permite qualificar o  $P_o$  do solo (Aleixo et al., 2019; Rinaldi et al., 2021). Uma falta de padrão para solos fortemente intemperizados pode justificar resultados superestimados ou subestimados dos teores de  $P_o$ , prejudicando o conhecimento do seu comportamento nos solos (Rinaldi, 2018).

Desta forma, é importante conhecer e compreender o comportamento do  $P_o$  no solo para que as grandes reservas deste nutriente, acarretadas pelo alto uso excedente de fertilizantes químicos ricos em P (ANDA, 2011), possam ser acessadas e liberadas por meio de processos biogeoquímicos, transformando o  $P_o$  legado em um grande reservatório de nutrientes para o uso das plantas (George et al., 2018), minimizando não só os custos de produção com a redução de adubos químicos como também diminuindo os riscos de eutrofização dos corpos hídricos.

Diferentes práticas agrícolas são adotadas em todo o mundo e, dessa forma, podem influenciar na dinâmica e teor de um nutriente no solo. Sistemas convencionais ou conservacionistas, adubações inorgânicas ou orgânicas, monocultivos ou sistemas agroflorestais contribuem de maneiras diferentes para a possível mineralização do  $P_o$  no solo. O aumento do rendimento das culturas com o uso de fertilizantes inorgânicos na produtividade de plantas é abaixo de 25% (MacDonald et al., 2011) e o uso das

fontes orgânicas podem ser uma alternativa sustentável para manutenção da produtividade.

Além disso, os problemas climáticos tomam relevância em todo o mundo com a projeção de alterações da precipitação, resultando em secas mais frequentes e intensas em algumas áreas e chuvas mais intensas e enchentes em outras, e temperatura média global. Clima e vegetação sempre estiveram relacionados, mas as mudanças climáticas também acarretam impactos na disponibilidade de nutrientes, como se pode ver nos estudos do ciclo do C (i.e., sequestro de carbono) mas pouco se fala sobre sua interferência na dinâmica do  $P_o$  dos solos (Tian et al., 2022; Zhang et al., 2005; Vitousek et al., 2010; Hou et al., 2018). Estudos que avaliem quantitativamente essa interferência climática sobre os teores de  $P_o$  no solo podem acender um alerta sobre os manejos a serem adotados para minimizar os efeitos negativos na disponibilidade do nutriente para as plantas.

O objetivo deste estudo foi ampliar a compreensão do comportamento do fósforo nos solos brasileiros. Para isso, foram analisadas as concentrações de  $P_o$  em diferentes regiões do Brasil, em diferentes usos da terra e com diversos extratores, por meio de uma revisão sistemática associada à análise descritiva. Essa análise foi baseada em dados provenientes de estudos publicados em todo o território brasileiro, sob diversas condições edáficas e climáticas, assim como em diferentes classes de solos. Foram testadas as hipóteses de que (i) solos com maiores teores de argila apresentem maiores teores de fósforo orgânico devido à capacidade da argila de adsorver e reter compostos orgânicos, (ii) as Florestas Plantadas aumentam o teor de  $P_o$  no solo por seu maior aporte vegetal, (iii) solos mais intemperizados apresentam maior reserva de  $P_o$  e, (iv) o método de extração de  $P_o$  proposto por Bowman e Moir (1993) é mais indicado para solos intemperizados.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Conjunto de dados

Foi realizada uma ampla busca em bases de dados, incluindo Web of Science, Google Scholar, ScienceDirect e Scielo, para encontrar estudos que abordassem as concentrações de fósforo orgânico ( $P_o$ ) em solos no território brasileiro. Foram tabulados 451 conjuntos de dados da camada superficial, contendo as concentrações

de  $P_0$  em diferentes regiões do Brasil, em diferentes usos da terra e com diversos extratores (conforme mostrado na Figura 1 e na Tabela S1).

Foram tabuladas informações sobre os autores e os anos em que as pesquisas foram realizadas. O método de extração de  $P_0$  foi especificado para cada sítio, bem como o método de digestão do P total do solo. As regiões, estados e cidades também foram tabuladas e, por meio delas, foi possível obter informações climáticas das regiões, quando não especificadas no trabalho, como altitude, latitude, precipitação e temperatura média e clima. As classes de solo e textura foram extraídas dos artigos. Quando não informada a classe de solo, a mesma foi obtida por meio de inferência como características físicas e mapas de escala regional.

Os usos da terra foram diferenciados como Agroflorestas, Floresta Plantada, Pastagem, Plantio Direto, Sistema Convencional ou Vegetação Nativa.

As características físicas e químicas foram tabuladas como o teor de argila, carbono orgânico total, nitrogênio, P total digerido, P total extraído, P inorgânico e P orgânico.

Todos os estudos foram tabulados e os que não informaram alguma variável de interesse eram descartados ao realizar a análise referente à mesma variável. Entretanto, não era descartado do conjunto total. Assim, as análises que foram realizadas são oriundas de diferentes  $n$  amostral.

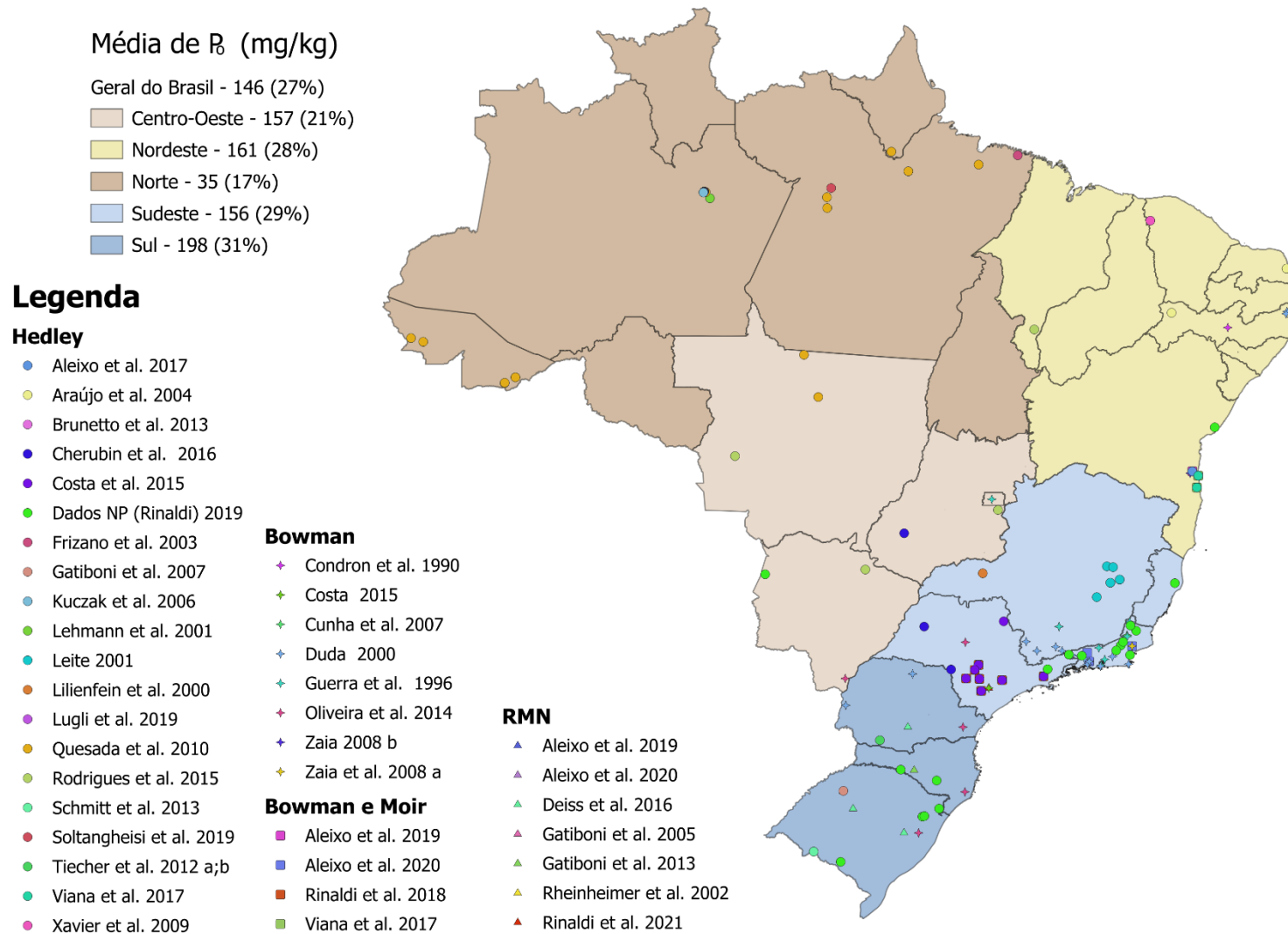


Figura 1. Distribuição dos locais incluídos na revisão sistemática e a distribuição dos teores de P nas macrorregiões do Brasil.

## Análise estatística

Como mencionado, apenas as camadas superficiais foram incluídas nas análises para evitar autocorrelação e dependência de dados. Foram calculados índices climáticos por meio das razões entre temperatura anual média e precipitação anual média (TAM:PAM) para obtenção da variável TAM:PAM (em °C em oposição a mm) e apenas as razões serão relatadas ao longo deste estudo.

Por se tratar de análises realizadas com uma junção de trabalhos de diferentes regiões e metodologias, é esperada uma distribuição não paramétrica dos dados e, por essa razão, trabalhou-se com as medianas. Foi realizada uma análise descritiva dos dados. Médias aritméticas foram realizadas para todas as variáveis numéricas tabeladas, acompanhadas do erro-padrão da média. Além disso foram calculadas as medianas e os intervalos entre quartis para a confecção dos *Boxplot* entre as variáveis dos diferentes usos da terra, classes de solo e métodos de extração.

Foram analisadas as correlações tau ( $\tau$ ) de *kendall* do  $P_0$  com as variáveis climáticas temperatura e pluviosidade, bem como com latitude e altitude. Também foram correlacionadas com P total do solo (mg/kg), pH, COT (g/kg), nitrogênio (g/kg), argila, TAM:PAM. A argila foi correlacionada com a porcentagem de recuperação de  $P_0$  do solo. As correlações de  $\tau$  de Kendall foram analisadas para cada atributo acima mencionado dentro dos diferentes métodos de extração: Bowman, Bowman e Moir, Hedley e RMN.

As análises foram realizadas utilizando o software R - 4.2.1(R Core Team, 2022) e o software SigmaPlot 12.0. (Systat Software, 2011).

## Boxplot

O boxplot é um resultado gráfico da análise descritiva feita com dados não paramétricos em que se é permitido ver um resumo dos dados. É possível ver uma caixa com o 1º quartil dos dados e uma segunda caixa com o 3º quartil representando a mediana dos dados à esquerda e, à direita, a mediana central. As linhas posteriores às caixas são referentes aos intervalos de confiança dos dados, máximo e mínimo. A mediana se trata da medida central dos dados, enquanto a média é referente a concentração dos dados de uma distribuição (Figura 2). *Outliers* que se diferem significativamente do conjunto de dados poder ser plotados individualmente.



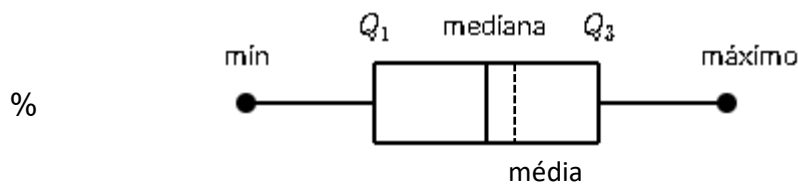


Figura 2. Representação esquemática de um Boxplot.

## RESULTADOS

Distribuição do  $P_o$  do solo em diferentes classes de solo, usos da terra, métodos de extração e classe textural.

Foi possível tabular 451 dados com 13 classes de solos diferentes (Organossolo,  $n=11$ ; Neossolo,  $n=12$ ; Cambissolo,  $n=20$ ; Luvisolo,  $n=8$ ; Vertissolo,  $n=2$ ; Chernossolo,  $n=29$ ; Gleissolo,  $n=1$ ; Espodossolo,  $n=2$ ; Nitossolo,  $n=11$ ; Planossolo,  $n=2$ ; Plintossolo,  $n=4$ ; Argissolo,  $n=76$ ; e Latossolo,  $n=270$ ) (figura 3). Os dados foram organizados de acordo com a área relativa no Brasil, dada a proporção no Mapa de solos do Brasil (Figura 3). O  $P_o$  médio é mais alto nos Organossolos (462 mg/kg). O menor teor de  $P_o$  médio foi encontrado nos Espodossolos (10 mg/kg). Os Planossolos, Chernossolos, Gleissolos e Organossolos, apresentaram um percentual de proporção de 46%, 43%, 41% e 37% de  $P_o$  em relação ao P total digerido do solo, respectivamente. As demais classes apresentaram em média 30% de  $P_o$  com mínima de 17% e máxima de 30% (Nitossolo e Argissolos, respectivamente) (figura 3).

O Latossolo é a classe com o maior número amostral, com uma distribuição em todo território brasileiro, apresentando os resultados com mais pontos periféricos (figura 4). Os Espodossolos, Gleissolos, Vertissolos e Planossolos não foram incluídos no *boxplot*, por apresentarem um  $n$  amostral baixo. Os Plintossolos apresentaram uma mediana de teores de  $P_o$  com 47 mg/kg, seguido dos Neossolos com uma mediana de 55 mg/kg de  $P_o$ , os Latossolos com 85 mg/kg, os Luvisolos com 90 mg/kg, Cambissolos com 122 mg/kg, Chernossolos 171 mg/kg, os Argissolos com 179 mg/kg, os Nitossolos com 381 mg/kg e a maior mediana com os Organossolos, com 417 mg/kg (figura 4).

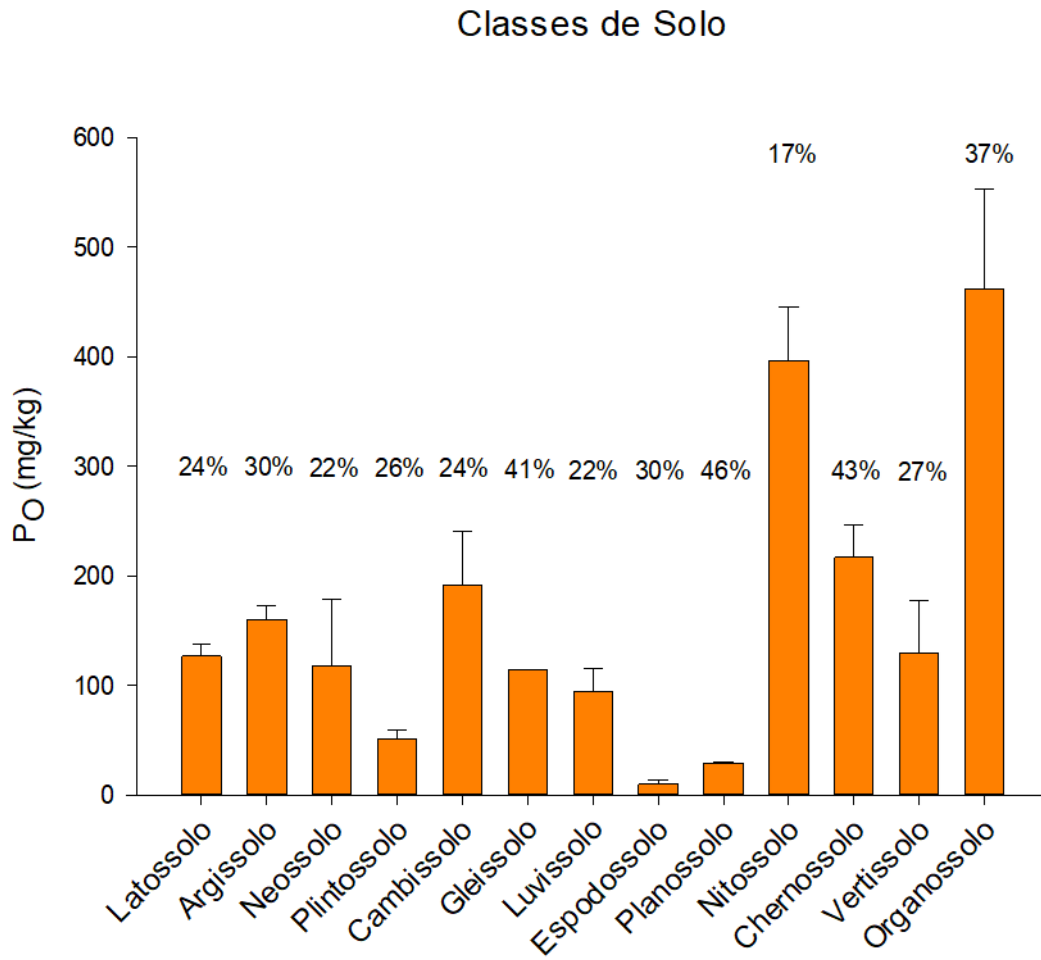


Figura 3. Médias obtidas pelos teores de P<sub>O</sub> em relação às classes de solos no Brasil e seu percentual de proporção em relação ao P total digerido do solo. (n=398).

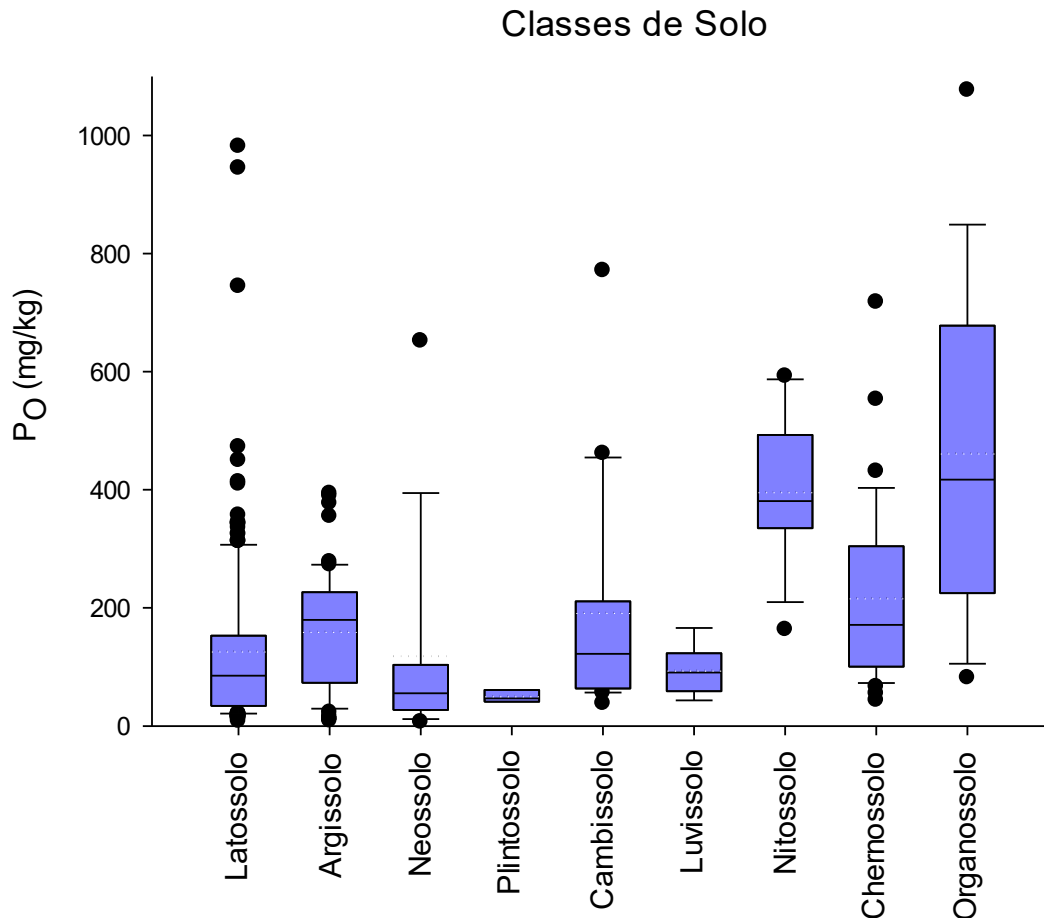


Figura 4. Teores de fósforo orgânico em diferentes classes de solos obtidas de um levantamento de estudos com solos brasileiros. O limite da caixa mais próximo de zero indica o 1º quartil (25%), uma linha dentro da caixa marca a mediana, a linha tracejada marca a média e o limite da caixa mais distante de zero indica o 3º quartil (75%). Os Bigodes (barras de erro) acima e abaixo da caixa indicam os intervalos de confiança (percentis 90 e 10) e os pontos pretos indicam pontos periféricos (*outliers*) (n=332).

Os usos da terra foram classificados em 6 sistemas (n=342), Agroflorestas (n=33), Floresta plantada (n= 51), Pastagem (n=42), Plantio Direto (n=46), Sistema Convencional (n=10) e Vegetação Nativa (n=86) (Figura 5). As Agroflorestas e o Plantio direto apresentaram os maiores teores de  $P_o$  médio com 230 e 197 mg/kg, respectivamente. Os menores teores foram vistos na Vegetação Nativa (80 mg/kg). A maior proporção obtida entre o  $P_o$  e o P total digerido foi obtida pelo Plantio Direto (33%) e Sistema Convencional (27%). Os demais sistemas mantiveram umas proporções próximas a 24% (Figura 5). As medianas fugiram das médias com a sequência decrescente entre Agroflorestas (224 mg/kg) > Sistema Convencional (175

mg/kg) > Plantio Direto (149 mg/kg) > Floresta Plantada (91 mg/kg) > Pastagem (85 mg/kg) > Vegetação Nativa (25 mg/kg) (Figura 6).

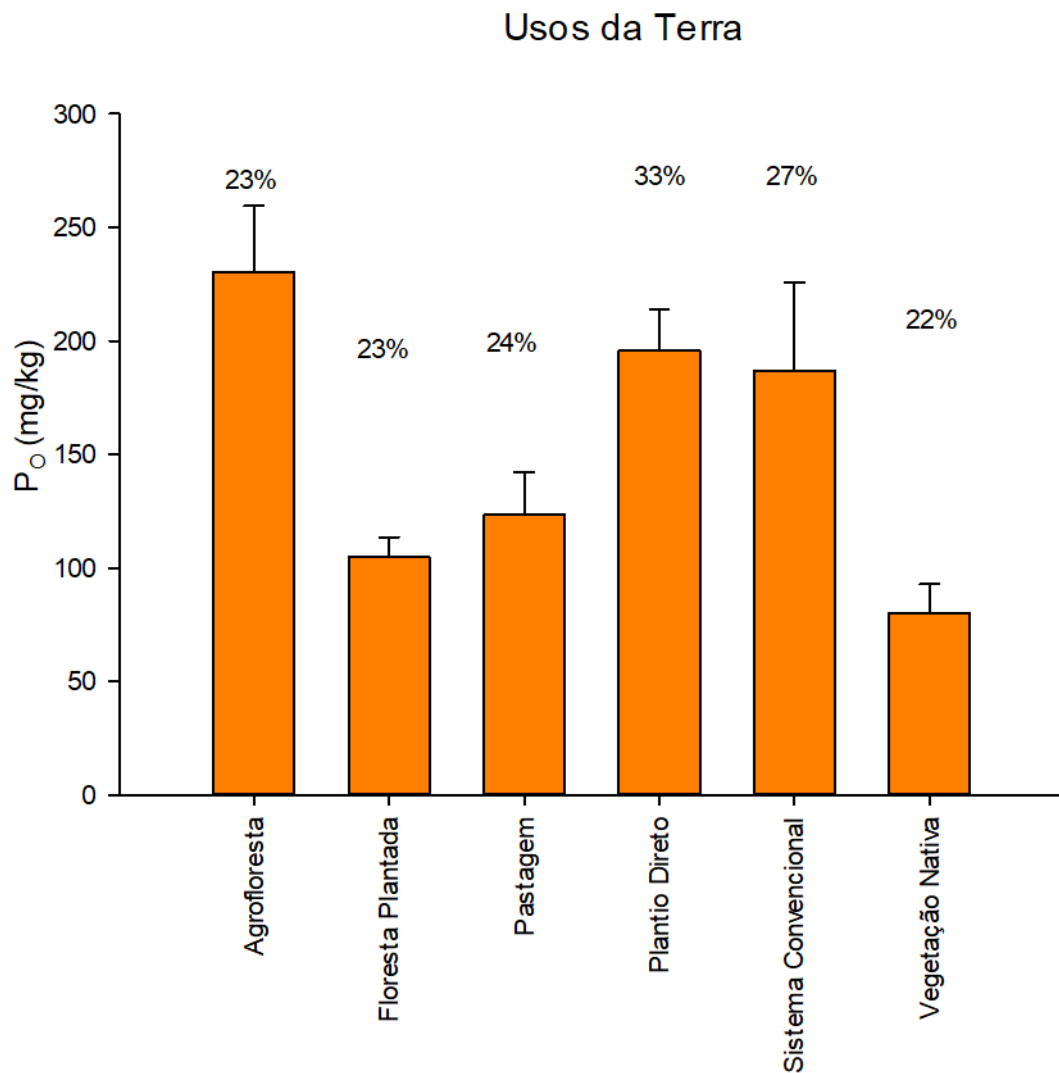


Figura 5. Médias obtidas pelos teores de  $P_o$  em relação aos diferentes usos da terra em solos no Brasil e seu percentual de proporção em relação ao  $P$  total digerido do solo. (n=342).

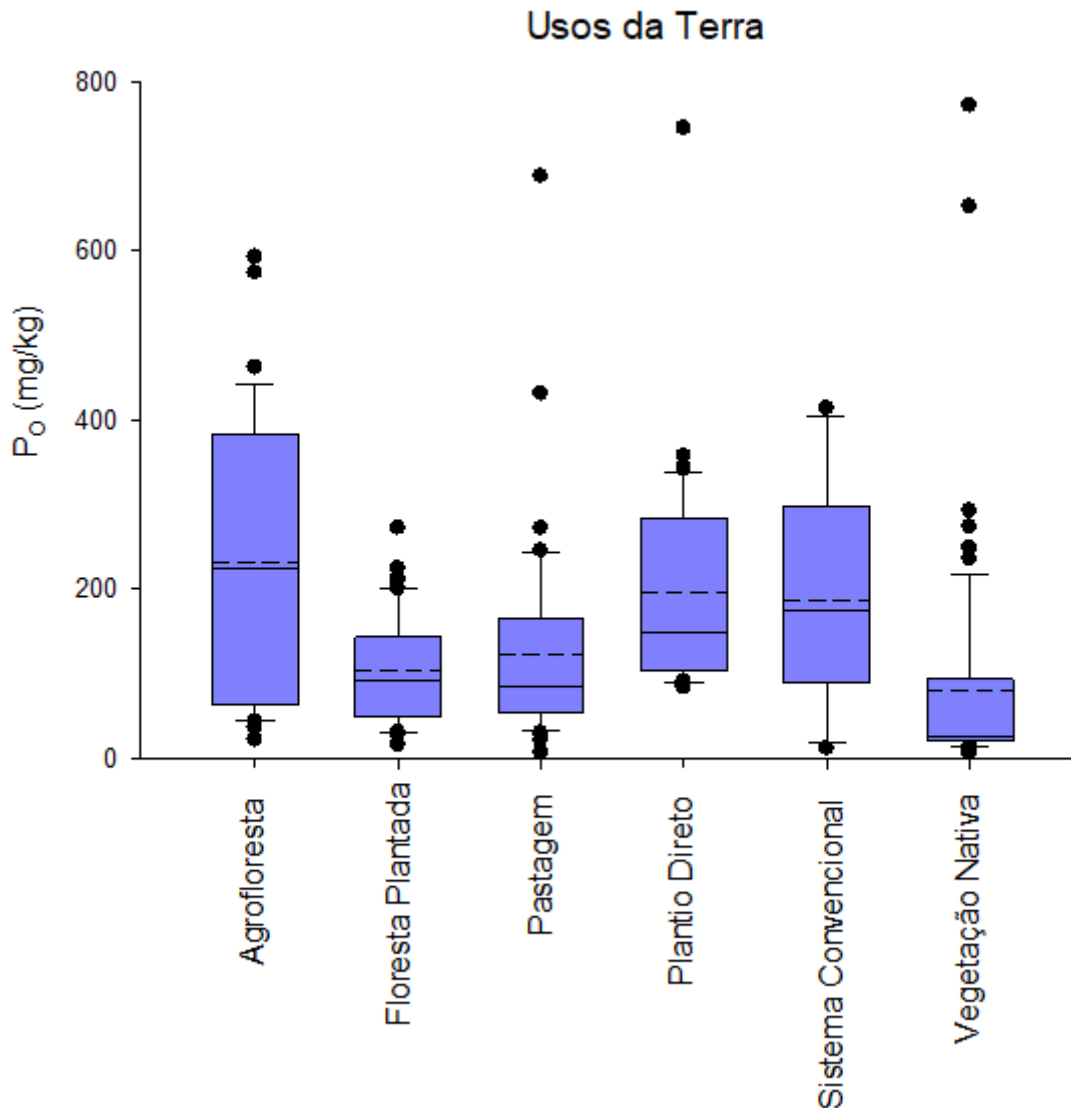


Figura 6. Teores de fósforo orgânico em diferentes usos da terra. O limite da caixa mais próximo de zero indica o 1º quartil (25%), uma linha dentro da caixa marca a mediana, a linha tracejada marca a média e o limite da caixa mais distante de zero indica o 3º quartil (75%). Os Bigodes (barras de erro) acima e abaixo da caixa, indicam os intervalos de confiança (percentis 90 e 10) e os pontos pretos indicam pontos periféricos (*outliers*) (n=342).

Na figura 7 pode-se observar as diferenças de  $P_O$  entre os diferentes métodos de extração. Foram avaliados 328 resultados de concentrações de  $P_O$  obtidos por 4 métodos de extração diferentes: Bowman (n=127), Bowman e Moir (1983) (n= 17), Hedley (n=136) e RMN (n=48). É possível observar a sequência decrescente seguida por Bowman e Moir (176 mg/kg) em extrair o  $P_O$ , Bowman seguido de (170 mg/kg) > Hedley (133 mg/kg) > RMN (156 mg/kg). O percentual de proporção de  $P_O$  extraído

em relação ao P total do solo variou de 22 a 33% entre os extratores seguindo a ordem potencial de extração Bowman e Moir > Hedley > Bowman > RMN (Figura 7). As medianas apresentadas foram superiores em Bowman e Moir seguida de Hedley e Bowman e, por último, RMN (Figura 8).

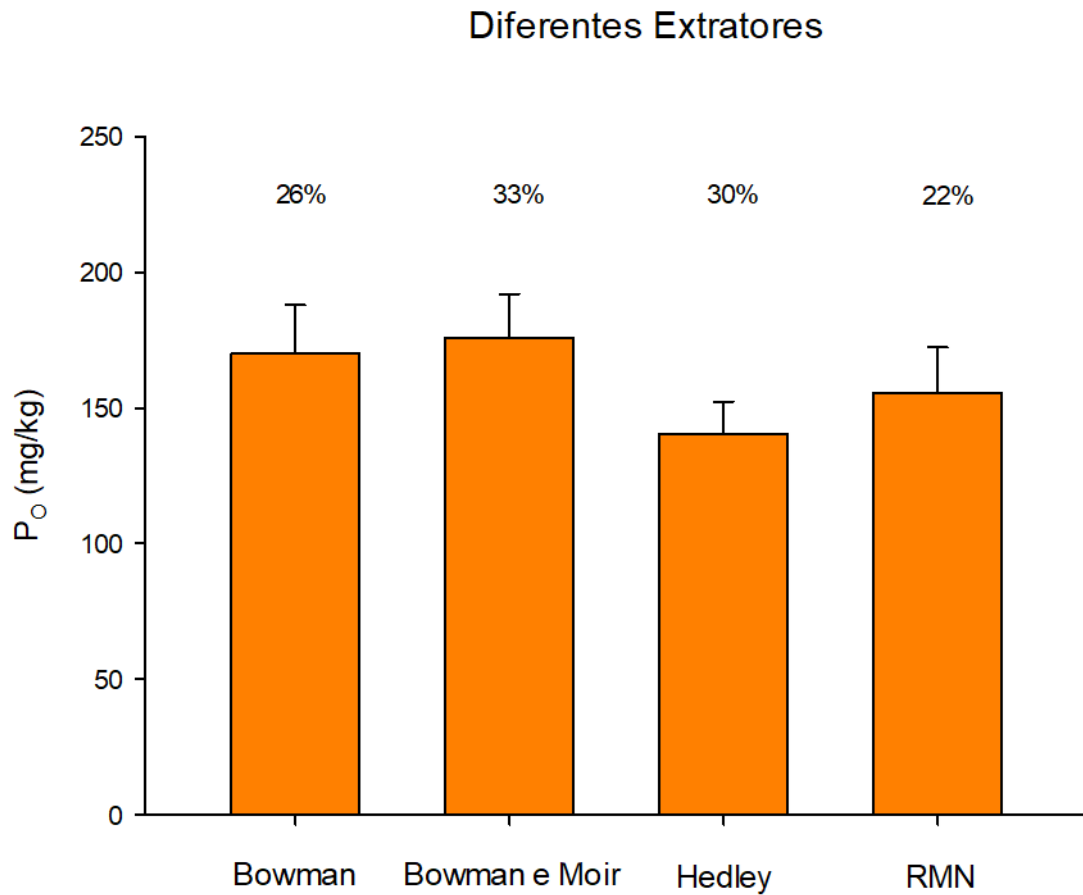


Figura 7. Médias obtidas pelos teores de P<sub>0</sub> em relação aos diferentes métodos de extração utilizados em solos no Brasil e seu percentual de proporção em relação ao P total digerido do solo. (n=328).

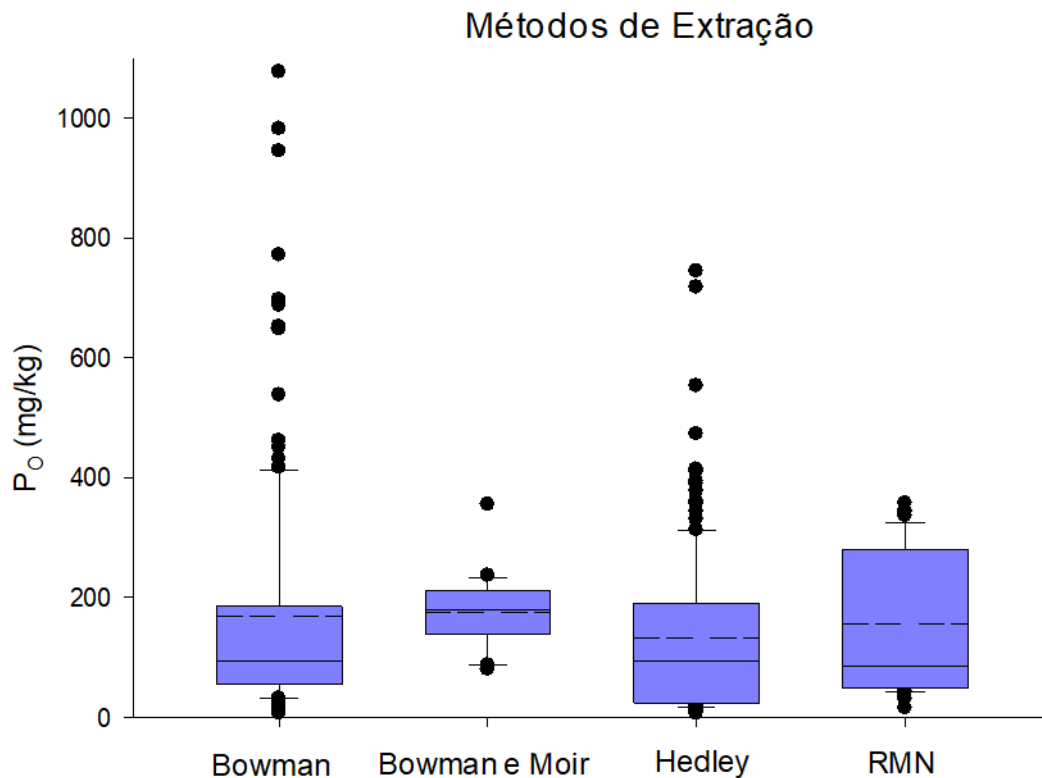


Figura 8. Teores de fósforo orgânico extraídos por diferentes metodologias obtidas de um levantamento de estudos com solos brasileiros. O limite da caixa mais próximo de zero indica o 1º quartil (25%), uma linha dentro da caixa marca a mediana, a linha tracejada marca a média e o limite da caixa mais distante de zero indica o 3º quartil (75%). Os Bigodes (barras de erro) acima e abaixo da caixa indicam os intervalos de confiança (percentis 90 e 10) e os pontos pretos indicam pontos periféricos (*outliers*) (n=328).

Foi possível tabular dados com todas as diferentes texturas do solo. Foram analisados 375 resultados, obtendo-se textura arenosa (n=81), média (n=104), argilosa (n=106) e muito argilosa (n=84). As médias dos teores de  $P_o$  foram superiores em solos de textura muito argilosa (190 mg/kg) > argilosa (185 mg/kg) > média (164 mg/kg) > arenosa (62 mg/kg) (Figura 9). O percentual de proporção entre o  $P_o$  e o P total do solo variou de 21% a 32%. Os solos com textura muito argilosos apresentaram a maior proporção, seguido dos solos de textura média (31%), argilosos (23%) e por último, os arenosos (Figura 9). As classes com maiores teores de argila apresentaram as maiores medianas (Figura 10). Os solos com textura muito argilosa apresentaram média e mediana (181 e 150 mg/kg, respectivamente), superiores às outras classes

texturais. Os solos argilosos apresentaram mediana de  $P_o$  igual a 115 mg/kg. Os solos com classe textural média apresentaram valores de mediana iguais a 111 mg/kg. Os solos arenosos apresentaram mediana de 24 mg/kg (Figura 10).

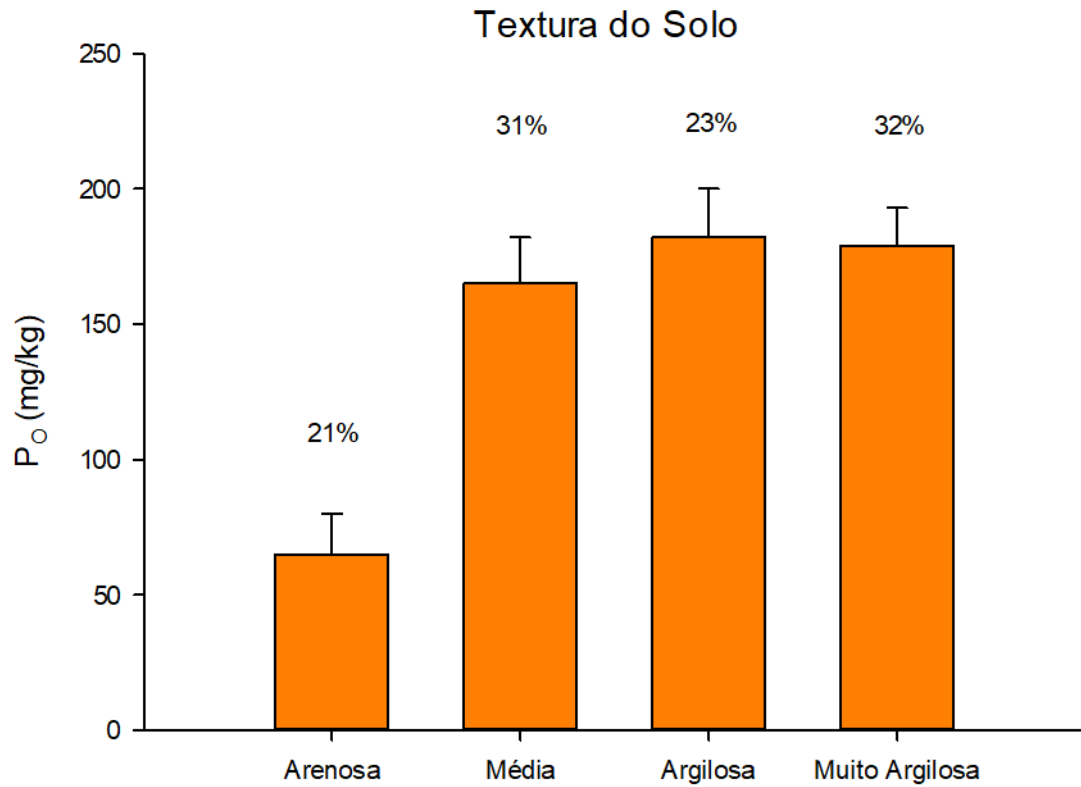


Figura 9. Médias obtidas pelos teores de  $P_o$  em relação às diferentes texturas em solos no Brasil e seu percentual de proporção em relação ao P total digerido do solo. (n=375).



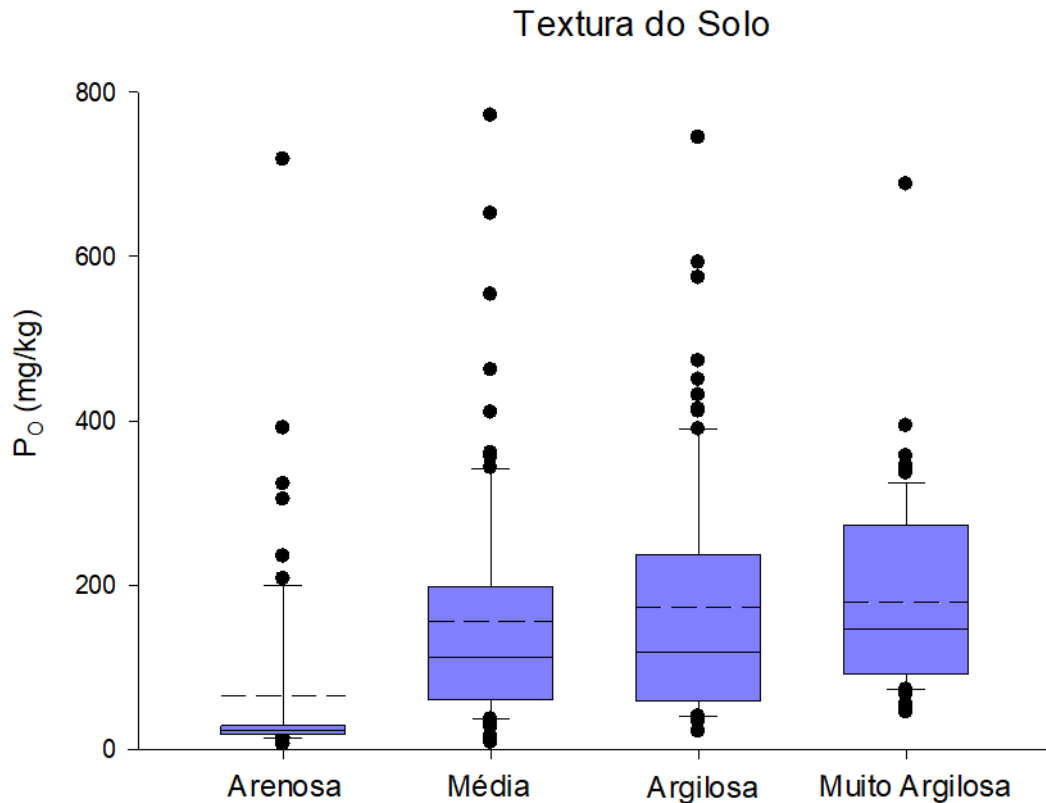


Figura 10. Teores de fósforo orgânico em diferentes classes texturais obtidas de um levantamento de estudos com solos brasileiros. O limite da caixa mais próximo de zero indica o 1º quartil (25%), uma linha dentro da caixa marca a mediana, a linha tracejada marca a média e o limite da caixa mais distante de zero indica o 3º quartil (75%). Os Bigodes (barras de erro) acima e abaixo da caixa, indicam os intervalos de confiança (percentis 90 e 10) e os pontos pretos indicam pontos periféricos (*outliers*). (n=378).

#### Proporção $P_o$ entre os diferentes métodos de digestão do solo

Foram analisadas as diferenças entre os diferentes métodos de digestão do solo. Digestão nitroperclórica (n=151), sulfúrica (n=136) e ignição (n=45) foram comparadas. Observou-se uma taxa média da proporção de  $P_o$  próximo de 33%, variando de 27% para a digestão sulfúrica, 35% para a digestão nitroperclórica e 36% para ignição (figura 11).

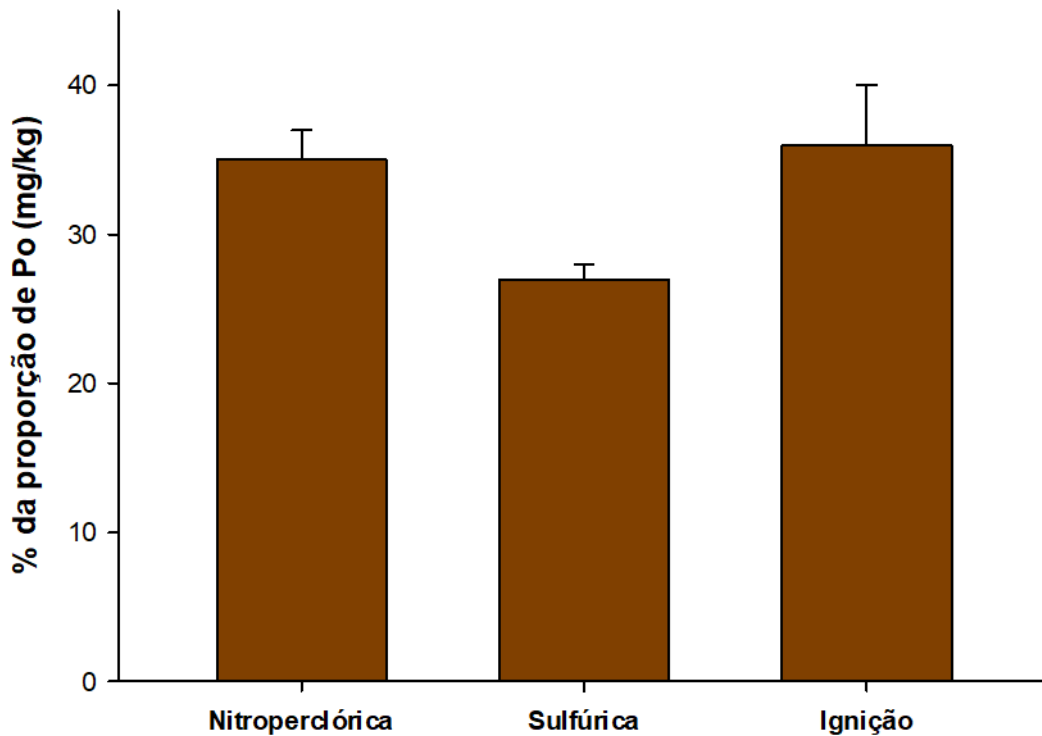


Figura 11. Percentual médio obtido pelos teores de P<sub>0</sub> em relação a proporção percentual de P total do solo extraídos de solos no Brasil. (n=332).

Correlações entre os teores de P<sub>0</sub> do solo sob influência de fatores climáticos e edáficos.

Há uma alta correlação entre os teores de P<sub>0</sub> e o P total digerido do solo ( $\tau=0,38$ ,  $p<0,001$ ,  $n=261$ ). Quanto maior é o *pool* de P total, maior é o *pool* orgânico (Figura 12). Os teores de P<sub>0</sub> e COT apresentaram correlação significativa ( $\tau=0,25$ ,  $p<0,001$ ,  $n=363$ ). O mesmo foi observado para nitrogênio (N) ( $\tau=0,19$ ,  $p<0,001$ ,  $n=137$ ) e pH ( $\tau=0,13$ ,  $p<0,001$ ,  $n=353$ ) (figura 12).

Pode-se verificar as correlações de P<sub>0</sub> com as variáveis climáticas na figura 13. Quanto maior a altitude, maiores são os teores de P<sub>0</sub> ( $\tau=0,06$ ,  $p<0,05$ ,  $n=407$ ). Também foram observadas correlações significativas entre temperatura ( $\tau=-0,24$ ,  $p<0,001$ ,  $n=407$ ), Precipitação ( $\tau=-0,14$ ,  $p<0,001$ ,  $n=377$ ) e Latitude ( $\tau=-0,29$ ,  $p<0,001$ ,  $n=407$ ) sendo, porém, correlações negativas. Quanto menores as temperaturas, precipitações e latitude, menores serão os teores de P<sub>0</sub> (figura 13).

Nem todas as variáveis climáticas apresentaram correlações significativas. A correlação entre a taxa TAM:PAM não se correlacionou significativamente com o teor de  $P_o$  do solo ( $\tau=0,07$ ,  $p<0,06$ ,  $n=376$ ). A mesma tendência foi observada para a correlação entre argila e a porcentagem de recuperação do  $P_o$  ( $\tau=0,09$ ,  $p<0,02$ ,  $n=264$ ) (Figura 14). Em relação aos teores de argila do solo, houve uma correlação positiva e significativa com teores de  $P_o$  ( $\tau=0,22$ ,  $p<0,001$ ,  $n=330$ ) (figura 14).

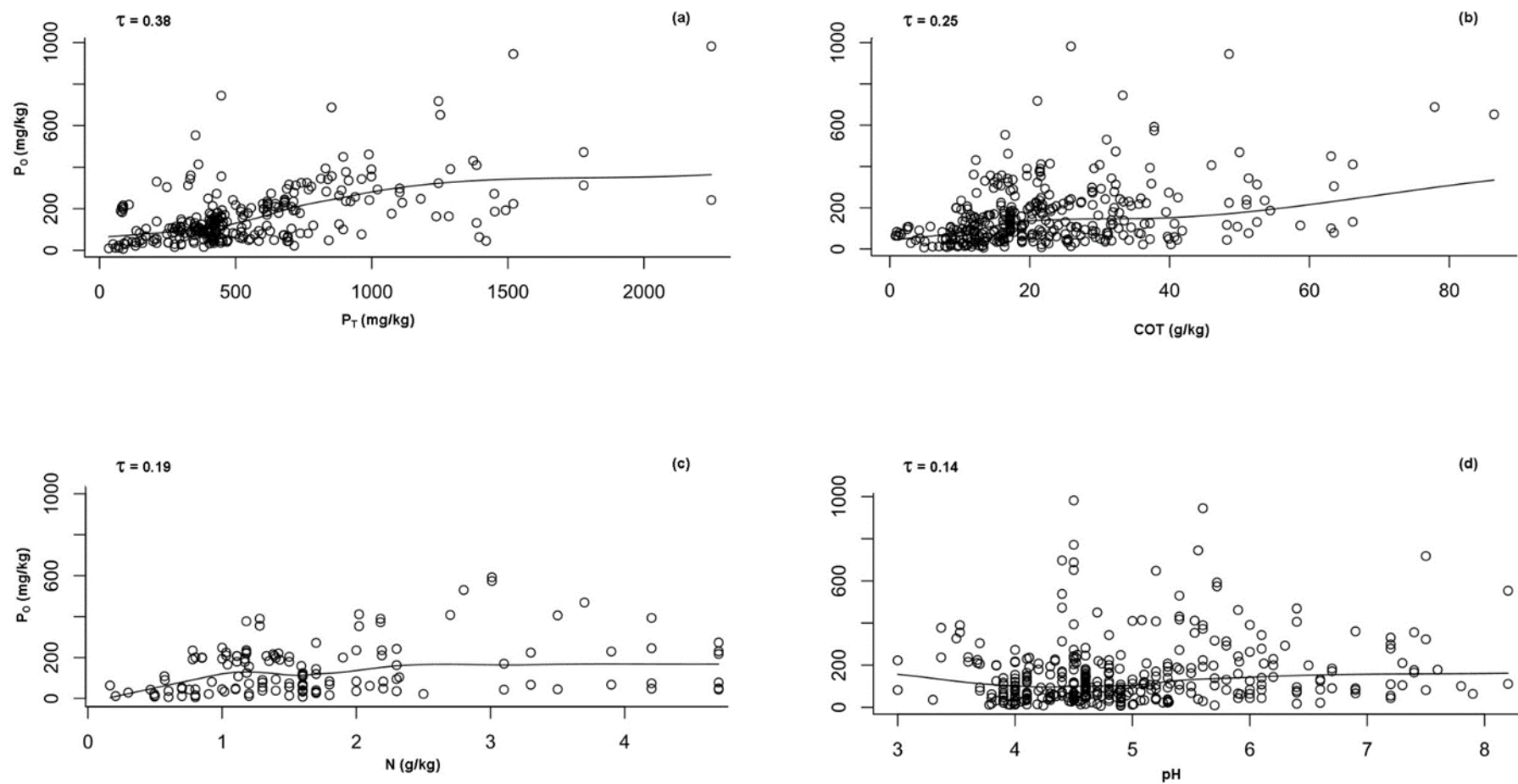


Figura 12. Influência dos fatores edáficos: (a) P total, (b) COT, (c) Nitrogênio e (d) pH sobre a influência do fósforo orgânico do solo. Os valores do coeficiente de correlação de  $\tau$  de *Kendall* também são mostrados

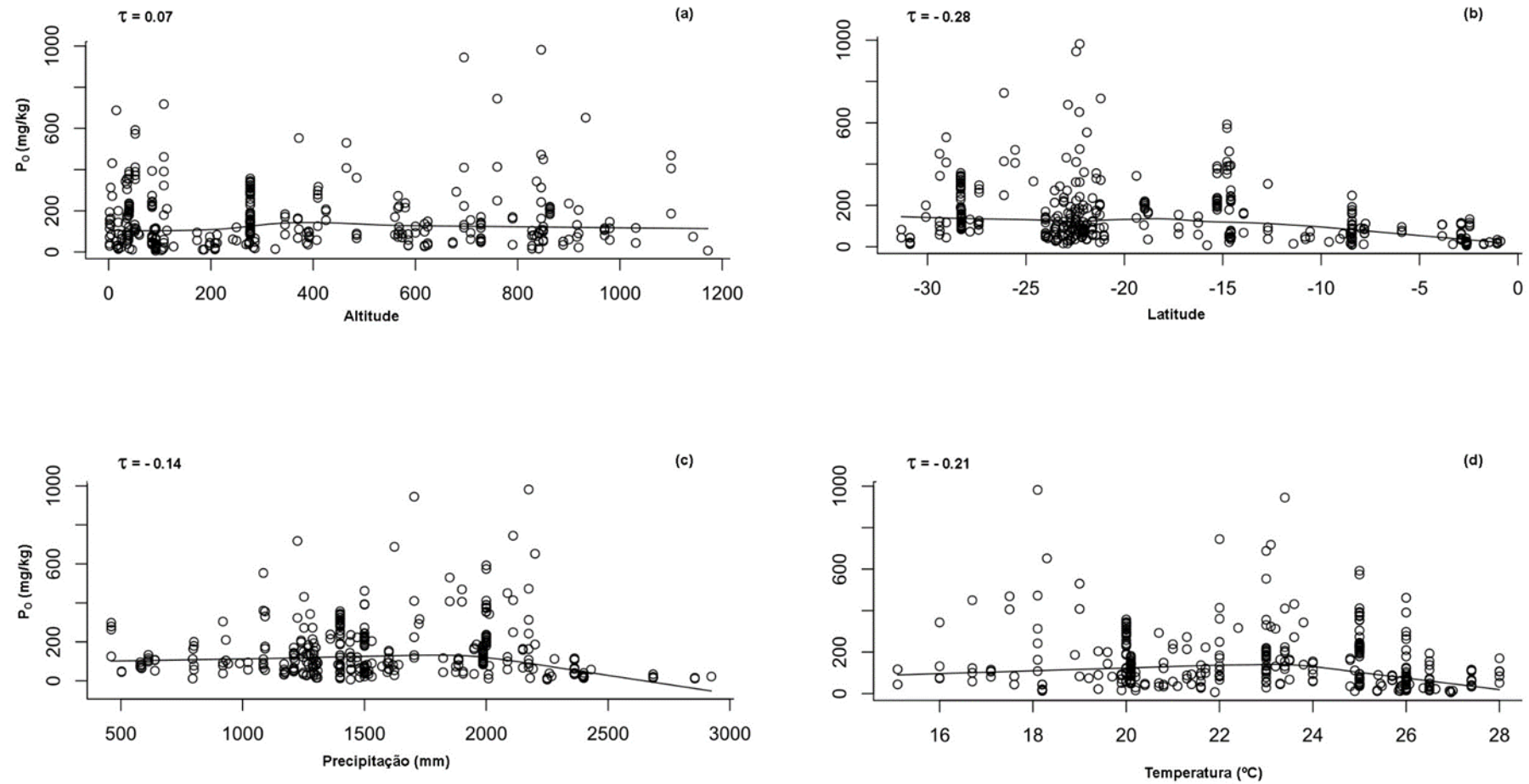


Figura 13. Influência dos fatores climáticos: altitude (a), Altitude (b) latitude (c) precipitação e (d) temperatura - °C sobre a influência do fósforo orgânico do solo. Os valores do coeficiente de correlação de  $\tau$  de *Kendall* também são mostrados.

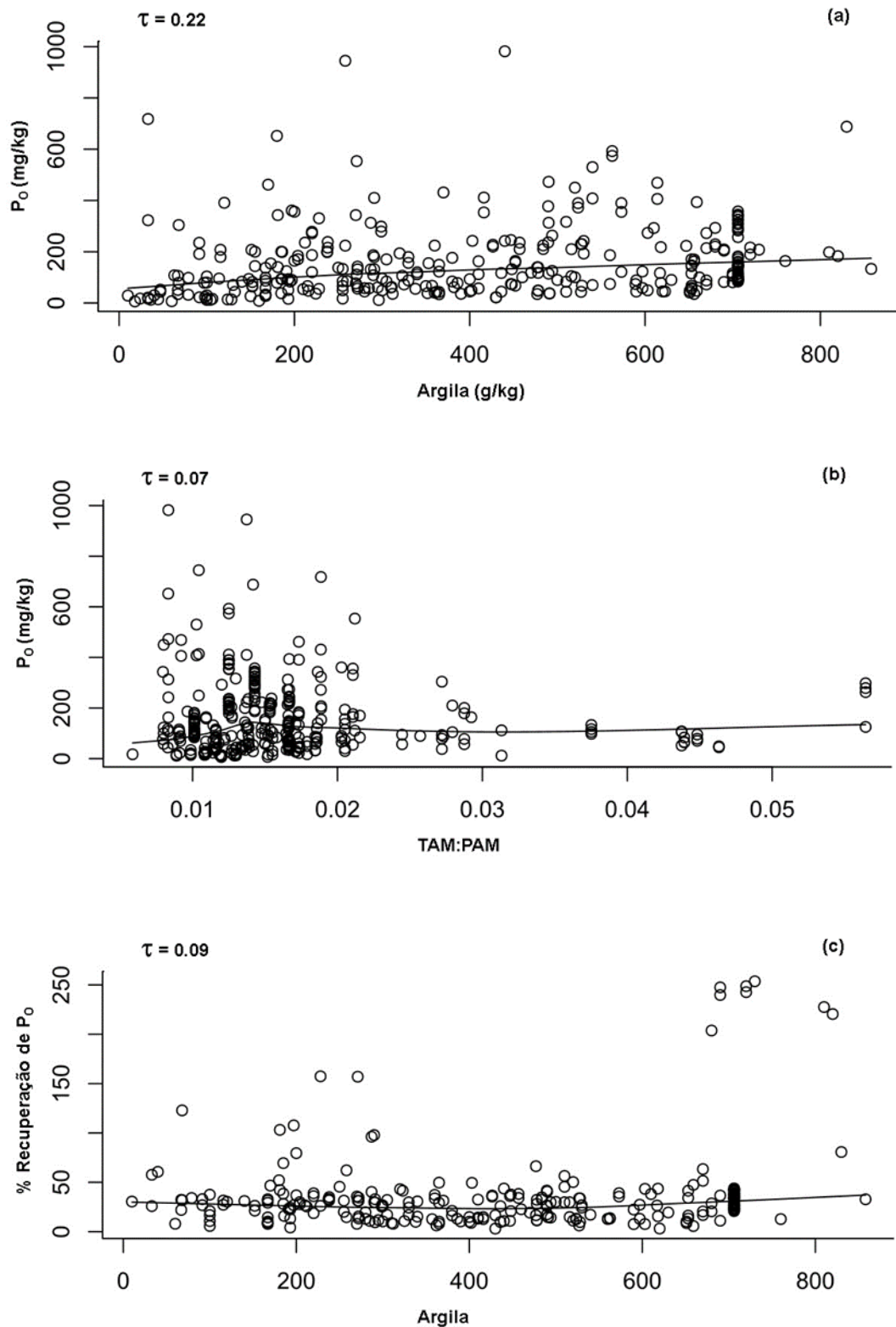


Figura 9. Influência da: Argila (a), TAM:PAM (b) sobre a influência do fósforo orgânico do solo e Argila (c) sobre o % de recuperação de  $P_o$ . Os valores do coeficiente de correlação de  $\tau$  de *Kendall* também são mostrados

Correlações entre os diferentes métodos de extração e atributos edáficos e climáticos do solo.

Ao analisar a correlação dos atributos edáficos e climáticos com os diferentes métodos de extração, foi possível observar que o método proposto por Bowman não apresenta correlação significativa com nenhuma variável climática levantada, diferentemente dos demais métodos, que apresentam forte correlação com os atributos climáticos (tabela 2).

Na tabela 2 também é possível observar a forte correlação positiva entre o P total digerido do solo com todos os métodos de extração de P<sub>o</sub> estudados. A RMN foi fortemente correlacionada com o pH do solo ( $\tau=0,76$ ,  $p<0,001$ ). O método de Bowman também se correlacionou significativamente com o pH ( $\tau=0,23$ ,  $p<0,01$ ). Já as extrações com os métodos de Bowman e Moir (1993) e Hedley (1982) não se correlacionaram significativamente (tabela 2).

Os métodos de Bowman ( $\tau=0,31$ ,  $p<0,001$ ), Bowman e Moir (1993) ( $\tau=0,50$ ,  $p<0,01$ ) e Hedley ( $\tau=0,35$ ,  $p<0,001$ ) se correlacionaram fortemente com o COT. A ressonância não apresentou correlação significativa com COT (Tabela 2). Já os teores de argila foram fortemente correlacionados com os métodos de Bowman e Moir (1993) ( $\tau=0,48$ ,  $p<0,01$ ), Hedley ( $\tau=0,31$ ,  $p<0,001$ ) e RMN ( $\tau=0,36$ ,  $p<0,001$ ), não apresentando correlação significativa com o método de Bowman (tabela 2).

Poucos autores abordaram ou tabelaram o nitrogênio do solo e por essa razão o  $n$  amostral foi baixo, não sendo possível ver correlações entre ele e os métodos de extração, exceto para Hedley ( $\tau=0,21$ ,  $p<0,05$ ) (tabela 2).

Correlações entre os diferentes usos da terra e atributos edáficos e climáticos do solo.

Ao analisar a correlação dos atributos edáficos e climáticos entre os diferentes usos da terra, foi possível observar que as florestas plantadas e as pastagens não apresentam correlação significativa com nenhuma variável climática levantada, diferentemente dos demais métodos, que apresentam correlação com os atributos climáticos, principalmente a vegetação nativa (tabela 3).

Na tabela 3 também é possível observar a forte correlação positiva entre o P total digerido do solo com todos os diferentes usos da terra. Considerando os fatores

edáficos, as agroflorestas apresentaram ainda correlação forte e significativa com a argila ( $\tau=0,22$ ,  $p<0,001$ ). O mesmo comportamento pode ser observado para os outros sistemas, exceto para o Plantio direto.

As amostragens tabuladas com relação ao N e pH do solo foram baixas e não possibilitou a análise para todos os usos da terra e os que puderam ser correlacionados não apresentaram significância, a exceção da pastagem que se correlacionou significativamente com o N do solo ( $\tau=0,28$ ,  $p<0,05$ ) (tabela 3).

Foi possível obter uma correlação significativa entre o COT e os usos da terra como pastagem ( $\tau=0,27$ ,  $p<0,01$ ), sistema convencional ( $\tau=0,76$ ,  $p<0,001$ ) e Vegetação nativa ( $\tau=0,27$ ,  $p<0,001$ ) (tabela 3).

A vegetação nativa se correlacionou positivamente com todos os fatores climáticos analisados. Plantio direto e Agroflorestas também se correlacionaram com os fatores climáticos, porém a correlação foi negativa (Tabela 3). Já o sistema convencional se correlacionou positiva e significativamente com a altitude e a precipitação ( $\tau=0,33$ ,  $p<0,05$  e ( $\tau=0,40$ ,  $p<0,01$ ), respectivamente) (tabela 3).

Correlações entre os diferentes tipos de solos e atributos edáficos e climáticos do solo.

Dada a grande variação de classes de solos analisadas e, em alguns casos, um baixo  $n$  amostral, não foram observadas grandes correlações para a maioria das classes de solos analisadas (Tabela 1, Tabela 4).

O oposto foi observado para os Latossolos, com um  $n$  amostral superior a 270. Assim, para essa classe de solos só não se obteve correlações significativas entre o PO e o N (fator edáfico) e TMA:PMA (fator climático) (Tabela 4).

Na Tabela 4 também pode-se observar que os Argissolos apresentaram correlações significativas e positivas para os atributos edáficos analisados, com exceção do pH.

Tabela 2. Resultados das correlações de  $\tau$  de *Kendall* entre os teores de  $P_o$  extraídos por diferentes métodos em função dos atributos do solo e clima

Atributos	Extratores
-----------	------------



<b>Edáficos</b>	<b>Bowman</b>	<b>Bowman e Moir</b>	<b>Hedley</b>	<b>RMN</b>
Argila	>0,05	<b>&lt;0,01</b> 0,48	<b>&lt;0,001</b> 0,31	<b>&lt;0,001</b> 0,36
COT	<b>&lt;0,001</b> 0,31	<b>&lt;0,01</b> 0,50	<b>&lt;0,001</b> 0,35	>0,05
N	>0,05	-	<b>&lt;0,05</b> 0,21	>0,05
pH	<b>&lt;0,01</b> 0,23	>0,05	0,14	<b>&lt;0,001</b> 0,76
P <sub>T</sub>	<b>&lt;0,001</b> 0,53	<b>&lt;0,001</b> 0,68	<b>&lt;0,001</b> 0,20	<b>&lt;0,001</b> 0,44

<b>Climáticos</b>	<b>Bowman</b>	<b>Bowman e Moir</b>	<b>Hedley</b>	<b>RMN</b>
TMA:PMA <sup>(1)</sup>	>0,05	<b>&lt;0,001</b> -0,57	<b>&lt;0,001</b> 0,18	<b>&lt;0,001</b> -0,39
Altitude	>0,05	<b>&lt;0,001</b> -0,71	<b>&lt;0,001</b> 0,28	>0,05
Temperatura	>0,05	<b>&lt;0,001</b> 0,59	<b>&lt;0,001</b> -0,14	<b>&lt;0,001</b> -0,38
Precipitação	>0,05	<b>&lt;0,001</b> 0,56	<b>&lt;0,001</b> -0,22	>0,05
Latitude	>0,05	<b>&lt;0,001</b> 0,56	<b>&lt;0,001</b> -0,19	<b>&lt;0,001</b> -0,55

O primeiro número representa o valor de  $p$ , o segundo o  $Tau$  para todas as correlações significativas ( $p < 0,05$ ;  $< 0,001$  e  $< 0,001$ ). (1) Temperatura e Precipitação média anual.

Tabela 3. Resultados das correlações de  $\tau$  de *Kendall* entre os teores de  $P_o$  extraídos por diferentes usos da terra em função dos atributos do solo e clima

Atributos		Usos da terra				
Edáficos	Agrofloresta	Floresta Plantada	Pastagem	Plantio Direto	Sistema Convencional	Vegetação Nativa
Argila	<0,001 0,22	<0,001 0,31	<0,01 0,28	>0,05	<0,001 0,45	<0,01 0,26
COT	>0,05	>0,05	<0,01 0,27	>0,05	<0,001 0,76	<0,001 0,27
N	>0,05	>0,05	<0,05 0,28	NA	NA	>0,05
pH	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05
$P_T$	<0,001 0,41	<0,001 0,39	<0,001 0,51	<0,001 0,64	<0,001 0,64	<0,001 0,66
Climáticos	Agrofloresta	Floresta Plantada	Pastagem	Plantio Direto	Sistema Convencional	Vegetação Nativa
TMA:PMA <sup>(1)</sup>	>0,05	>0,05	>0,05	<0,001 0,37	>0,05	<0,001 -0,34
Altitude	<0,05 -0,33	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05 0,33	<0,05 0,24
Temperatura	<0,001 -0,39	>0,05	>0,05	<0,01 -0,33	>0,05	<0,001 -0,49
Precipitação	>0,05	>0,05	>0,05	<0,001 -0,33	<0,01 0,40	<0,001 -0,45
Latitude	<0,001 -0,42	>0,05	>0,05	<0,001 -0,44	>0,05	<0,001 -0,51

O primeiro número representa o valor de p, o segundo o Tau para todas as correlações significativas ( $p < 0,05$ ;  $< 0,001$  e  $< 0,001$ ). (1) Temperatura e Precipitação média anual. NA = Sem Dados / Número Amostral abaixo de 10

Tabela 4. Resultados das correlações de  $\tau$  de *Kendall* entre os teores de  $P_o$  extraídos por diferentes classes de solo em função dos atributos do solo e clima

Atributos	Classes de Solos						
	Edáficos	Lato. <sup>(4)</sup>	Argi. <sup>(5)</sup>	Cambi. <sup>(7)</sup>	Nito. <sup>(8)</sup>	Cherno. <sup>(9)</sup>	Organo. <sup>(10)</sup>
Argila		<0,001 0,29	<0,05 0,47	>0,05	>0,05	>0,05	NA
COT		<0,001 0,15	<0,001 0,41	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05
N		>0,05	<0,05 0,33	NA	NA	NA	NA
pH		<0,001 0,23	>0,05	>0,05	<0,01 0,67	>0,05	>0,05
$P_T$		<0,001 0,53	<0,001 0,63	<0,01 0,60	>0,05	<0,01 0,51	<0,05 0,67
Climáticos	Lato. <sup>(4)</sup>	Argi. <sup>(5)</sup>	Cambi. <sup>(7)</sup>	Nito. <sup>(9)</sup>	Cherno. <sup>(10)</sup>	Organo. <sup>(11)</sup>	
TMA:PMA <sup>(1)</sup>	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	
Altitude	<0,001 0,24	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	
T (°C) <sup>(2)</sup>	<0,001 -0,43	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	
Precip. <sup>(3)</sup>	<0,001 -0,19	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	
Latitude	<0,001 -0,46	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05 0,73	

O primeiro número representa o valor de p, o segundo o Tau para todas as correlações significativas ( $p < 0,05$ ;  $< 0,001$  e  $< 0,001$ ). (1) Temperatura e Precipitação média anual; (2) Temperatura; (3) Precipitação; (4) Latossolo; (5) Argissolo; (6) Neossolo; (7) Cambissolo; (8) Nitossolo (9) Chernossolo; (10) Organossolo. NA = Sem Dados / Número Amostral abaixo de 10.

Obs. Os Neossolos não apresentaram nenhuma correlação significativa.

## DISCUSSÃO

Os resultados mostraram um teor de  $P_0$  em Latossolos próximos aos de solos mais jovens, como os Neossolos. Walker e Syers (1976) propuseram que o P do solo decresce em razão do seu alto grau de intemperismo, durante esse processo, os minerais contendo fósforo podem ser decompostos e perdidos do sistema, levando a uma diminuição global nos teores de fósforo no solo. No entanto, o  $P_0$  se comporta de maneira diferente, inicialmente há um decréscimo, pois, a decomposição da matéria orgânica pode liberar fósforo para formas mais solúveis ou facilmente lixiviáveis, resultando em uma diminuição nos teores de  $P_0$  disponível no solo.

Entretanto, é necessário levar em consideração que à medida que o intemperismo continua e o solo atinge um estado mais avançado, ocorrem processos de formação de compostos orgânicos mais estáveis e recalcitrantes, como a formação de matéria orgânica oclusa em minerais ou complexada com coloides do solo, com a contribuição da fração oclusa no seu “estado estacionário terminal” (Turner et al., 2007), podendo servir como uma reserva estável  $P_0$  no solo, contribuindo para o aumento dos teores de  $P_0$  em estágios mais avançados de intemperismo.

O aumento de  $P_0$  nos solos mais intemperizados se justifica porque nesses solos há um aumento da presença de minerais de alumínio (Al) e óxidos de ferro (Fe), associado à diminuição do pH do solo. Essas condições criam um ambiente propício para a adsorção do  $P_0$  aos minerais de Al e óxidos de Fe presentes no solo, associado à diminuição do pH (Yang et al., 2011).

A sequência crescente dos teores de  $P_0$  de acordo com o tempo de formação dos solos foi similar à encontrada por Yang et al. (2011). Eles avaliaram as transformações do P nos solos em função da pedogênese por meio do extrator Hedley observando que solos com material de origem rico em matéria orgânica apresentaram elevados teores de  $P_0$  e solos mais intemperizados, como Latossolos e Argissolos, foram superiores que outras classes de solos mais jovens. Resultado este que se justifica pela relação entre a textura superficial mais grosseira e sua interferência dificultando as interações organominerais.

Outro fator que influenciou nos maiores teores de  $P_0$  nos solos foram os diferentes usos da terra. Os resultados sugerem que os sistemas agroflorestais podem contribuir com aportes de  $P_0$  no solo que se justificam em função do alto aporte de material vegetal nesses sistemas. Os sistemas agroflorestais estudados foram obtidos

de trabalhos realizados por Duda (2000) e Lehmann et al. (2001), Zaia et al. (2008 a, b), Viana et al. (2017) e Aleixo et al. (2019) em que as agroflorestas eram em formadas por cacau e seringueira, árvores ricas em material vegetal, acumuladores de material orgânico (Aleixo et al., 2019).

Esse resultado é extremamente relevante pois, através da ciclagem do material orgânico, (Martinazzo et al., 2007) esse nutriente pode ser reabsorvido pelas plantas através do ciclo biogeoquímico e proporcionar um menor impacto ambiental, reduzindo a necessidade de fertilizações inorgânicas (Turner et al., 2003; Gama Rodrigues et al., 2007). Existem também estudos que evidenciam a capacidade de algumas plantas em associação a fungos micorrízicos liberarem o  $P_o$  adsorvido aos minerais (Tiessen et al., 1994) possibilitando maiores teores de  $P_o$  em solos mais intemperizados.

Para que se possa utilizar o  $P_o$  como um serviço ecossistêmico, através da ciclagem de nutrientes, é crucial que se tenha conhecimento dos seus teores no solo, assim como é feito com o P inorgânico por meio de análises de solo frequentes, a fim de estimar a necessidade de adubação fosfatada. No entanto, ao contrário do fósforo inorgânico, não há um método padrão estabelecido para a análise do fósforo orgânico no solo, porém há diferentes métodos para se obter o  $P_o$  do solo.

Este estudo mostrou que o método de Hedley et al. (1982) e Bowman e Moir (1993) se aproximam tanto em totais quanto em percentuais em suas proporções em relação ao P total do solo. Ao se considerar os dados de Viana et al. (2017) com dois métodos de extração, Hedley et al. (1982) e Bowman e Moir (1993), feitos em um mesmo solo e compará-los, também se encontrarão as mesmas semelhanças entre os métodos, com Hedley (317 mg/kg, 32% de recuperação em relação ao P total digerido) superior a Bowman e Moir (1993) (282 mg/kg, 28% de recuperação em relação ao P total digerido). Entretanto, esses valores são estatisticamente semelhantes (dados não publicados).

Resultados semelhantes foram encontrados por Rinaldi (2018), em um estudo de comparação de métodos com o  $P_o$  extraído por Bowman (1989), Bowman e Moir (1993), Hedley (1982) e RMN do mesmo solo. Os resultados demonstram que apesar do fracionamento de Hedley (1982) apresentar maior capacidade de recuperar o  $P_o$  do solo, ele é um método mais caro e demorado quando comparado as extrações de Bowman e Moir (1993), que além de possuir uma capacidade de associação com a

RMN e, assim, qualificar o  $P_0$  presente nos solos, também é vantajoso financeiramente e mais simples tecnicamente.

Ainda sobre as metodologias, foi observado que os métodos de ignição e digestão nitroperclórica são mais eficientes na digestão do P total do solo quando comparados à digestão sulfúrica. Resultados semelhantes foram obtidos por Rinaldi (2018), que associou este resultado à possível superioridade de P inorgânico ( $P_I$ ) sobre  $P_0$  na extração pelo método de Bowman (1989) acarretando baixas respostas em relação ao P total (Rita et al., 2013; Oliveira et al., 2014).

Há mais fatores que podem influenciar o comportamento do  $P_0$  nos solos vistos neste estudo, como a classe textural, com os maiores teores de  $P_0$  encontrados nos solos mais argilosos. Solos mais argilosos tendem a ter uma maior capacidade de adsorção de fósforo devido à presença de cargas negativas em suas superfícies coloidais. Essas cargas negativas permitem que o solo retenha íons de fósforo em suas superfícies, tornando-os menos disponíveis para as plantas (Turner et al., 2013).

É sabido que o  $P_0$  tem uma alta correlação com a argila. A estrutura da argila, especialmente em solos com altos teores de minerais de argila expansíveis, como a montmorilonita, pode contribuir para uma maior retenção de fósforo. Isso ocorre devido à capacidade desses minerais de expandir e contrair em resposta à variação na umidade do solo, criando espaços microscópicos onde os íons de fósforo podem ser retidos.

Valkama et al. (2009) estudaram os efeitos da fertilização fosfatada ao longo dos anos e observaram que as adubações são mais eficientes em solos com menores teores de argila, isso porque, quando em altas concentrações, rapidamente o P inorgânico é adsorvido e fixado nas argilas presentes que favorecem tal ligação com grande área de superfície específica e sítios reativos (Gérard, 2016; Rheinheimer et al., 2000).

Além da influência dos fatores edáficos, foi possível observar correlações significativas entre os teores de  $P_0$  com atributos climáticos como altitude, precipitação, temperatura e latitude. As correlações negativas encontradas neste estudo em relação às variáveis temperatura, precipitação e latitude correspondem ao esperado. Estes resultados estão de acordo com estudos de revisões sistemáticas globais realizados por Hou et al., (2018) e Spond (2020).

Foi observado neste estudo uma correlação negativa dos teores de  $P_0$  com a latitude e temperatura. Em regiões de baixas latitudes, onde as temperaturas são mais

altas e a precipitação é mais abundante, a decomposição da matéria orgânica tende a ser mais rápida, resultando em uma maior disponibilidade de fósforo no solo (Cleveland et al., 2011). Além disso, em regiões tropicais, onde a vegetação é exuberante e a atividade biológica é alta, os teores de fósforo no solo podem ser mais elevados devido à ciclagem intensa de nutrientes.

Já para a altitude a correlação foi positiva. Acredita-se que em altas altitudes, onde a temperatura é mais baixa, há limitação da mineralização de  $P_0$ , se acumulando no solo e aumentando os seus teores (Luo, et al., 2001). Em regiões de maior altitude, onde as temperaturas são mais baixas, a decomposição da matéria orgânica pode ser mais lenta, levando a uma acumulação gradual de fósforo no solo ao longo do tempo.

A mesma correlação negativa foi vista para a precipitação. Isso se justifica visto que em regiões com alta precipitação, a erosão do solo pode ser mais intensa, resultando na perda de fósforo do solo. Por outro lado, em regiões com baixa precipitação, a lixiviação de nutrientes pode ser menos pronunciada, resultando em uma maior retenção de fósforo no solo (Zhang et al., 2020).

Observou-se que as florestas plantadas e as pastagens não apresentaram correlação significativa com nenhuma variável climática. Isso sugere que são necessários mais estudos e uma maior amostragem para estimar se esses usos da terra podem ser menos influenciados ou não, pelos fatores climáticos considerados neste estudo em comparação com os demais métodos. Entender essas interações entre fatores edáficos, climáticos e o  $P_0$  do solo são importantes para escolher a melhor forma de manejar os solos driblando as interações que favoreçam a imobilização de P e facilitando e/ou propiciando meios dos microrganismos atuarem na mineralização de  $P_0$  funcionando como fonte de P para o aumento e manutenção da produtividade agrícola.

## CONCLUSÃO

As hipóteses levantadas para a construção deste trabalho foram aceitas pois, (i) quanto mais alto o teor de argila, mais altos foram os teores de  $P_0$ , (ii) as agroflorestas apresentaram os maiores teores médios de  $P_0$ , se aproximando de usos da terra com *inputs* de adubos inorgânicos, como nos sistemas convencionais, (iii) à exceção de solos com material de origem ricos de material orgânico, os Latossolos e Argissolos apresentaram proporções em percentual de  $P_0$  maiores que classes de

solos mais jovens e, (iv) o método de extração de  $P_0$  proposto por Bowman e Moir (1993) se mostrou eficiente em extrair o  $P_0$  em solos brasileiros com teores próximos ao método de Hedley.

A distribuição do  $P_0$  no solo é um aspecto crucial da fertilidade do solo e da produtividade agrícola. As análises obtidas por meio deste trabalho sobre os teores de  $P_0$  em diferentes classes de solo, usos da terra, métodos de extração e classe textural revela *insights* significativos sobre a variabilidade desse importante nutriente.

Além disso, foi possível ver a influência dos fatores climáticos sobre a dinâmica do  $P_0$  nos solos brasileiros por meio das correlações entre eles. Essas descobertas são essenciais para orientar práticas de manejo de solo e fertilização, visando a otimização da produtividade agrícola e a sustentabilidade ambiental em diversas regiões do país.

Neste contexto, mais estudos sobre a dinâmica de  $P_0$  e a influência de fatores edáficos e climáticos devem ser considerados visto que está ocorrendo a rápida mudança climática em todo o mundo e os efeitos negativos à fertilidade do solo que essas mudanças podem causar ainda não pouco conhecidos.

## RECONHECIMENTOS

Grato aos professores desta instituição pelo apoio ilimitado prestado durante o decorrer deste trabalho. O estudo foi realizado durante o período de Doutorado no departamento de Produção Vegetal da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aleixo, S. (2018) Especificação e transformações do fósforo orgânico em solos florestais e agroflorestais na região da mata atlântica no Brasil. Tese (Doutorado), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ. p. 105.

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.  
<https://doi.org/10.1007/s10457-016-9939-3716>

Aleixo, S.; Gama-Rodrigues, A.C.; Gama-Rodrigues, E.F.; Campello, E.F.C.; Silva, E.C.; Schripsema, J. 2020. Can soil phosphorus availability in tropical forest systems be increased by nitrogen-fixing leguminous trees? *Science of The Total Environment* 712:136405. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136405>

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. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00220>

ANDA - Associação Nacional para a Difusão de Adubos, 2011. Investimentos no Brasil (Investments in Brazil). Available at: <http://www.anda.org.br/multimedia/investimentos.pdf> (Acessado em: 15 julho 2022).

Araújo, M. S. B.; Schaefer, C. E. R.; Sampaio, E. V. S. B. (2004). Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latosols and Luvisols in northeastern Brazil. *Geoderma*. 119. Pag3-4. doi:10.1016/j.geoderma.2003.07.002

Bowman, R.A. 1989. A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric-acid and dilute base for soil organic phosphorus. *Soil Science Society of America Journal* 53(2):362–366.

Bowman, R.A.; Moir, J.O. 1993. Basic EDTA as an extractant for soil organic phosphorus. *Soil Science Society of America Journal* 57(6):1516–1518.

Brunetto, G., Lorensini, F., Ceretta, C. A., Gatiboni, L. C., Trentin, G., Giroto, E., Miotto, A., Lourenzi, C. R. and Melo, G. W. B. (2013). Soil phosphorus fractions in a sandy typic hapludalf as affected by phosphorus fertilization and grapevine cultivation period. *Community Soil Science Plant Analysis*, 44, 1937-1950. <http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2013.794819>

Cleveland, C. C., Townsend, A. R., Taylor, P., Alvarez-Clare, S., Bustamante, M. M. C., Chuyong, G., ... Wieder, W. R. (2011). Relationships among net primary productivity, nutrients and climate in tropical rain forest: a pan-tropical analysis. *Ecology Letters*, 14(9), 939–947. doi:10.1111/j.1461-0248.2011.01658.x

Condon, L.M.; Frossard, E.; Tiessen, H.; Newman, R.H.; Stewart, J.W.B. 1990. Chemical nature of organic phosphorus in cultivated and uncultivated soils under

- different environmental conditions. *Journal of Soil Science* 41:41–50. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00043.x>.
- Cooper J, Lombardi R, Boardman D, Carliell-Marquet C (2011) The future distribution and production of global phosphate rock reserves. *Resour Conserv Recycl* 57:78–86
- 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. <https://doi.org/10.3390/f7010015>
- Cunha, M.G.; Gama–Rodrigues, A.C.; Costa, G.S.; Velloso, A.C.X. 2007. Organic phosphorus in soils under montane forests; pastures and eucalyptus in Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 31:667–672 (in Portuguese, with abstract in English). <http://doi.org/10.1590/S0100-06832007000400007>
- Deiss, L.; de Moraes, A.; Dieckow, J.; Franzluebbbers, A. J.; Gatiboni, L. C.; Sasaki, G. I.; Carvalho, P.C.F. (2016). Soil phosphorus compounds in integrated crop–livestock systems of subtropical Brazil. *Geoderma*, 274, 88–96. doi:10.1016/j.geoderma.2016.03.028
- Duda, G. P.; Guerra, J. G. M.; Pereira, M. G.; Anjos, L. H. C.; Ribeiro, M. R. (2013) *Avaliação da biodisponibilidade de fósforo em diferentes classes de solos do Brasil*. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 34, n. 4, p. 1563-1576.
- Freiling, M., Tucher, S., Schmidhalter, U. (2022) Factors influencing phosphorus placement and effects on yield and yield parameters: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*. 2016:105257
- Frizano, J.; Vann, D. R.; Johnson, A. H.; Johnson, C. M.; Vieira, I. C. G.; e Zarin, D. J. (2003). Labile Phosphorus in Soils of Forest Fallows and Primary Forest in the Bragantina Region, Brazil. *Biotropica*, 35(1), 2–11. doi:10.2307/30043028.
- Frossard E, Condon LM, Oberson A, Sinaj S, Fardeau JC (2000) Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *Journal of Environmental Quality*, 29:15-23.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9946-x>

- Gatiboni, L. C., Brunetto, G., Rheinheimer, D. S., Kaminski, J., Pandolfo, C. M., Veiga, M, Flores, A. F. C., Lima, M. A. Silveira., Girotto, E., Copetti, A. C. C.. (2013). Spectroscopic quantification of soil phosphorus forms by  $^{31}\text{P}$ -nmr after nine years of organic or mineral fertilization. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(3), 640-648.
- Gatiboni, L.C.; Rheinheimer, D.S.; Flores, A.F.C.; Anghinoni, I.; Kaminski, J. e Lima, M.A.S. Phosphorus forms and availability assessed by  $^{31}\text{P}$ -NMR in successive cropped soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 36:2625-2640, 2005.
- George TS, Giles CD, Menezes-Blackburn D, Condrón LM, Gama-Rodrigues AC, Jaisi D, Bol R (2018) Organic Phosphorus in the terrestrial environment: a perspective on the state of the art and future priorities. *Plant Soil* 427:191–208
- Gérard F (2016) Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils—A myth revisited. *Geoderma* 262:213–226.
- Guerra, J.G.M.; Almeida, D.J.; Santos, G.A.; Fernandes, M.S. 1996. Organic phosphorus content in soil samples. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 31:291–299 (in Portuguese, with abstract in English). <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-3921.pab1996.v31.4484>
- Hedley, M.J.; Stewart, J.W.B.; Chauhan, B.S. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal* 46:970–976. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x>
- Hou, E., Chen, C., Luo, Y., Zhou, G., Kuang, Y., Zhang, Y., Heenan, M., Lu, X., Wen, D. (2018). Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*. 24:3344-3356.
- Lehmann, J.; Cravo, M. da S., de Macêdo, J. L. V., Moreira, A. e Schroth, G. (2001). Phosphorus management for perennial crops in central Amazonian upland soils. *Plant and Soil* . 237: 309–319, 2001.
- Lilienfein, J.; Wilcke, W.; Ayarza, M.A.; Vilela, L.; Lima, S.C.; Zech, W. (2000). Chemical fractionation of phosphorus, sulphur, and molybdenum in Brazilian savannah Oxisols under different land use. *Geoderma*. 96(1-2), 0–46. doi:10.1016/s0016-7061(00)00002-1.

- Lugli, L.F., Andersen, K.M., Aragão, L.E.O.C. et al. (2019) Multiple phosphorus acquisition strategies adopted by fine roots in low-fertility soils in Central Amazonia. *Plant Soil*. 450, 49–63. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-03963-9>
- Luo, Y., Wan, S., Hui, D., & Wallace, L. (2001). Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 413(6856), 622-625.
- Mabagala, S.F., Mng'ong'o, M.E. (2022) On the tropical soils; The influence of organic matter (OM) on phosphate bioavailability. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 29: 3635-3641.
- Oliveira, R.I.B.; Gama-Rodrigues, A.C.; Gama-Rodrigues, E.F.; Zaia, F.C.; Pereira, M.G; Fontana, A. 2014. Organic phosphorus in diagnostic surface horizons of different Brazilian soil orders. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38:1411–1420. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500006>
- Quesada, C. A., Lloyd, J., Schwarz, M., Patiño, S., Baker, T. R., Czimczik, C., Fyllas, N. M., Martinelli, L., Nardoto, G. B., Schmerler, J., Santos, A. J. B., Hodnett, M. G., Herrera, R., Luizão, F. J., Arneeth, A., Lloyd, G., Dezzeo, N., Hilke, I., Kuhlmann, I., Raessler, M., Brand, W. A., Geilmann, H., Moraes Filho, J. O., Carvalho, F. P., Araujo Filho, R. N., Chaves, J. E., Cruz Junior, O. F., Pimentel, T. P., and Paiva, R. (2010). Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeosciences*, 7, 1515–1541, <https://doi.org/10.5194/bg-7-1515-2010>, 2010.
- Rheinheimer, D. S.; Anghinoni, I. e Flores, A. F. (2002): Organic and inorganic phosphorus as characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance in subtropical soils under management systems, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33:11-12, 1853-1871
- Rinaldi, L.C.B., Aleixo, S., Silva, E.C., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Gonçalves, J.L.M., Rocha, J.H.T., Schripsema, J., (2021). <sup>31</sup>P NMR Spectroscopy and structural models of soil organic phosphorus under Eucalyptus. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. volume 120, pages83–97
- Rita, J.C.O.; Gama–Rodrigues, A.C.; Gama–Rodrigues, E.F.; Zaia, F.C.; Nunes, D.A.D. 2013. Mineralization of organic phosphorus in soil size fractions under different vegetation covers in the north of Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37:1207–1215. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000500010>
- Rodrigues, M.; Pavinato, P. S.; Withers, P. John A.; Teles, A. P. B.; Herrera, W. F. B. (2015). Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the

- Brazilian savanna. *Science of The Total Environment*, Volume 542, Part B, 1050-1061.
- Santos, H. G. dos; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C. dos; Oliveira, V. A. de; Lumberras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A. de; Araujo Filho, J. C. de; Oliveira, J. B. de; Cunha, T. J. F. 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. *Embrapa Solos*. 5ª edição. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 356 p.
- Soltangheisi, A., de Moraes, M.T., Cherubin, M.R., Alvarez, D.O., de Souza, L.F., Bieluczyk, W., Navroski, D., Bettoni Teles, A.P., Pavinato, P.S., Martinelli, L.A., Tsai, S.M., de Camargo, P.B., (2019). Forest conversion to pasture affects soil phosphorus dynamics and nutritional status in Brazilian Amazon. *Soil Tillage Res.* 194, 104330.
- Spohn, M. (2020). Phosphorus and carbon in soil particle size fractions: A synthesis. *Biogeochemistry*. <https://doi.org/10.1007/s10533-019-00633-x>
- Tian, K., Xing, Z., Kalkhajah, Y.K., Zhao, T., Hu, W., Huang, B., Zhao, Y. (2022) Excessive phosphorus inputs dominate soil legacy phosphorus accumulation and its potential loss under intensive greenhouse vegetable production system. *Journal of Environmental Management*. 303:114-149.
- Tiessen H, Cuevas E, Chacon P (1994) The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* 371:783.
- Turner, B. L., & Condon, L. M. (2013). Pedogenesis, nutrient dynamics, and ecosystem development: the legacy of T.W. Walker and J.K. Syers. *Plant and Soil*, 367(1-2), 1-10.
- Turner, B.L., Frossard, E., Baldwin, D.S. (2003) Organic phosphorus in the environment. Ascona, Swizerland: Organic Phosphorus, p.391.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00184>
- Walker, T. W. and Syers, J. K.: The fate of phosphorus during pedogenesis, *Geoderma*, 15, 1–19, 1976.

- Yang X, Post WM (2011) Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: a synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. *Biogeosciences*. 8:2907–2916
- Zaia, F.C.; Gama–Rodrigues, A.C.; Gama–Rodrigues, E.F.; Machado, R.C.R. 2008. Organic phosphorus in soils under cocoa agroecosystems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32:1987–1995 (in Portuguese, with abstract in English). <http://doi.org/10.1590/S0100-49206832008000500020>
- Zaia, F.C.; Gama–Rodrigues, A.C.; Gama–Rodrigues, E.F.; Moço, M.K.S.; Fontes, A.G.; Machado, R.C.R.; Baligar, V.C. 2012. Carbon; nitrogen; organic phosphorus; microbial biomass and N mineralization in soils under cacao agroforestry systems in Bahia; Brazil. *Agroforestry Systems* 86(2):197–212. <http://doi.org/10.1007/s10457-012-9550-4>.
- Zhang, H., Du, X., & Song, Z. (2020). Effects of Precipitation and Temperature on Soil Organic Phosphorus Fractions and Soil Microbial Community in Three Typical Forest Ecosystems of China. *Forests*, 11(11), 1157.

## Material Suplementar

Tabela S1. Caracterização das áreas de estudo de P<sub>o</sub> em solos brasileiros

Autor	Ano	Método	Estado	Prec (mm)	T (°C)	Alt (m)	Classe	Textura	pH	Uso da Terra
Gatiboni et al.	2013	RMN	Santa Catarina	1886	17.1	970	Latossolo	Argilosa	5.1	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2013	RMN	Santa Catarina	1886	17.1	970	Latossolo	Argilosa	4.9	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2013	RMN	Santa Catarina	1886	17.1	970	Latossolo	Argilosa	5.2	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2013	RMN	Santa Catarina	1886	17.1	970	Latossolo	Argilosa	5.0	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2013	RMN	Santa Catarina	1886	17.1	970	Latossolo	Argilosa	5.4	Plantio Direto
Aleixo et al.	2019	RMN	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Argilosa	4.1	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	RMN	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Argilosa	4.5	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	RMN	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Muito Argilosa	4.5	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	RMN	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Muito Argilosa	4.0	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	RMN	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Muito Argilosa	4.3	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	RMN	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Média	4.5	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	RMN	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Argilosa	4.3	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	RMN	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Argilosa	4.8	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	RMN	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Argilosa	4.6	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	RMN	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Argilosa	4.6	Pastagem
Aleixo et al.	2019	RMN	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Muito Argilosa	4.5	Vegetação Nativa
Rinaldi et al.	2021	RMN	São Paulo	1262	21.6	618	Neossolo	Média	4.0	Floresta Plantada





Gatiboni et al.	2005	RMN	Rio Grande do Sul	1400	20	277	Latossolo	Muito Argilosa	NA	Plantio Direto
Rheinheimer et al.	2002	RMN	Rio Grande do Sul	1400	20	277	Latossolo	Muito Argilosa	6.2	Plantio Direto
Rheinheimer et al.	2002	RMN	Rio Grande do Sul	1400	20	277	Latossolo	Muito Argilosa	5.8	Sistema Convencional
Rheinheimer et al.	2002	RMN	Rio Grande do Sul	1400	20	277	Latossolo	Argilosa	5.9	Plantio Direto
Rheinheimer et al.	2002	RMN	Rio Grande do Sul	1400	20	277	Latossolo	Argilosa	5.6	Sistema Convencional
Rheinheimer et al.	2002	RMN	Rio Grande do Sul	1400	20	277	Argissolo	Média	6.1	Plantio Direto
Rheinheimer et al.	2002	RMN	Rio Grande do Sul	1400	20	277	Argissolo	Média	5.5	Sistema Convencional
Deiss et al.	2016	RMN	Paraná	1900	17.5	1100	Latossolo	Muito Argilosa	6.4	Sistema Convencional
Deiss et al.	2016	RMN	Paraná	1900	17.5	1100	Latossolo	Muito Argilosa	6.4	Pastagem
Deiss et al.	2016	RMN	Rio Grande do Sul	1850	19	465	Latossolo	Argilosa	5.4	Sistema Convencional
Deiss et al.	2016	RMN	Rio Grande do Sul	1850	19	465	Latossolo	Argilosa	5.2	Pastagem
Deiss et al.	2016	RMN	Mato Grosso do Sul	1440	19.6	19	Argissolo	Média	6.2	Sistema Convencional
Deiss et al.	2016	RMN	Mato Grosso do Sul	1440	19.6	19	Argissolo	Média	6.2	Pastagem
Aleixo et al.	2020	RMN	Rio de Janeiro	1300	28	560	Latossolo	Média	5.4	Floresta Plantada
Aleixo et al.	2020	RMN	Rio de Janeiro	1300	28	560	Latossolo	Média	5.2	Floresta Plantada
Aleixo et al.	2020	RMN	Rio de Janeiro	800	23	39	Argissolo	Média	4.8	Floresta Plantada
Aleixo et al.	2020	RMN	Rio de Janeiro	800	23	39	Argissolo	Média	4.5	Floresta Plantada
Aleixo et al.	2020	RMN	Rio de Janeiro	800	23	39	Argissolo	Argilosa	4.2	Vegetação Nativa
Aleixo et al.	2020	RMN	Rio de Janeiro	800	23	39	Argissolo	Média	4.7	Pastagem
Aleixo et al.	2020	RMN	Rio de Janeiro	1292	26.5	2	Argissolo	Média	4.3	Agrofloresta

Aleixo et al.	2020	RMN	Rio de Janeiro	1292	26.5	2	Argissolo	Média	4.3	Agrofloresta
Aleixo et al.	2020	RMN	Rio de Janeiro	1292	26.5	2	Argissolo	Média	4.4	Agrofloresta
Viana et al.	2017	Bowman e Moir	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Arenosa	4.2	Vegetação Nativa
Viana et al.	2017	Bowman e Moir	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Arenosa	4.2	Pastagem
Viana et al.	2017	Bowman e Moir	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Média	3.8	Floresta Plantada
Viana et al.	2017	Bowman e Moir	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Argilosa	4.5	Vegetação Nativa
Viana et al.	2017	Bowman e Moir	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Argilosa	4.3	Pastagem
Viana et al.	2017	Bowman e Moir	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Argilosa	3.7	Floresta Plantada
Viana et al.	2017	Bowman e Moir	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Argilosa	3.4	Agrofloresta
Viana et al.	2017	Bowman e Moir	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Argilosa	3.5	Agrofloresta
Viana et al.	2017	Bowman e Moir	Bahia	2000	25	52	Nitossolo	Argilosa	5.6	Agrofloresta
Viana et al.	2017	Bowman e Moir	Bahia	2000	25	52	Nitossolo	Argilosa	5.7	Agrofloresta
Viana et al.	2017	Bowman e Moir	Bahia	2000	25	52	Nitossolo	Argilosa	5.5	Agrofloresta
Rinaldi et al.	2018	Bowman e Moir	São Paulo	1262	21.6	618	Neossolo	Média	4.0	Floresta Plantada
Rinaldi et al.	2018	Bowman e Moir	São Paulo	1210	20.1	728	Latossolo	Argilosa	3.9	Floresta Plantada
Rinaldi et al.	2018	Bowman e Moir	São Paulo	1210	20.1	728	Latossolo	Muito Argilosa	4.4	Floresta Plantada
Rinaldi et al.	2018	Bowman e Moir	São Paulo	1210	20.1	728	Cambissolo	Média	4.1	Floresta Plantada
Rinaldi et al.	2018	Bowman e Moir	São Paulo	1287	21.3	566	Argissolo	Muito Argilosa	4.0	Floresta Plantada
Rinaldi et al.	2018	Bowman e Moir	São Paulo	1170	21.6	586	Latossolo	Média	3.9	Floresta Plantada

Rinaldi et al.	2018	Bowman e Moir	São Paulo	1302	20.2	828	Neossolo	Arenosa	4.0	Floresta Plantada
Rinaldi et al.	2018	Bowman e Moir	São Paulo	1249	20.8	624	Latossolo	Argilosa	4.1	Floresta Plantada
Rinaldi et al.	2018	Bowman e Moir	São Paulo	1308	19.9	841	Latossolo	Média	4.6	Floresta Plantada
Aleixo et al.	2019	Bowman e Moir	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Argilosa	4.1	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	Bowman e Moir	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Argilosa	4.5	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	Bowman e Moir	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Muito Argilosa	4.5	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	Bowman e Moir	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Muito Argilosa	4.0	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	Bowman e Moir	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Muito Argilosa	4.3	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	Bowman e Moir	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Média	4.5	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	Bowman e Moir	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Argilosa	4.3	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	Bowman e Moir	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Argilosa	4.8	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	Bowman e Moir	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Argilosa	4.6	Agrofloresta
Aleixo et al.	2019	Bowman e Moir	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Argilosa	4.6	Pastagem
Aleixo et al.	2019	Bowman e Moir	Bahia	1500	25	85	Latossolo	Muito Argilosa	4.5	Vegetação Nativa
Aleixo et al.	2020	Bowman e Moir	Rio de Janeiro	1300	28	560	Latossolo	Média	5.4	Floresta Plantada
Aleixo et al.	2020	Bowman e Moir	Rio de Janeiro	1300	28	560	Latossolo	Média	5.2	Floresta Plantada
Aleixo et al.	2020	Bowman e Moir	Rio de Janeiro	800	23	39	Argissolo	Média	4.8	Floresta Plantada
Aleixo et al.	2020	Bowman e Moir	Rio de Janeiro	800	23	39	Argissolo	Média	4.5	Floresta Plantada
Aleixo et al.	2020	Bowman e Moir	Rio de Janeiro	800	23	39	Argissolo	Argilosa	4.2	Vegetação Nativa

Aleixo et al.	2020	Bowman e Moir	Rio de Janeiro	800	23	39	Argissolo	Média	4.7	Pastagem
Aleixo et al.	2020	Bowman e Moir	Rio de Janeiro	1292	26.5	2	Argissolo	Média	4.3	Agrofloresta
Aleixo et al.	2020	Bowman e Moir	Rio de Janeiro	1292	26.5	2	Argissolo	Média	4.3	Agrofloresta
Aleixo et al.	2020	Bowman e Moir	Rio de Janeiro	1292	26.5	2	Argissolo	Média	4.4	Agrofloresta
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Argissolo	NA	5.7	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Argissolo	NA	4.9	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Argissolo	NA	6.6	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Latossolo	NA	5.2	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Latossolo	NA	5.3	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Vertissolo	NA	7.6	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Luvissolo	NA	7.2	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Luvissolo	NA	6.7	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Luvissolo	NA	7.2	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Luvissolo	NA	7.9	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Vertissolo	NA	7.5	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Latossolo	NA	5.1	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Latossolo	NA	5.3	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Latossolo	NA	5.5	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Argissolo	NA	4.1	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Latossolo	NA	4.9	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Luvissolo	NA	4.8	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Chernossolo	NA	5.7	Vegetação Nativa

Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Latossolo	NA	5.9	Vegetação Nativa
Condrón et al.	1990	Bowman	Pernambuco	NA	NA	NA	Argissolo	NA	6.1	Vegetação Nativa
Zaia et al.	2008 a	Bowman	Rio de Janeiro	1400	26	39	Latossolo	Média	5.1	Floresta Plantada
Zaia et al.	2008 a	Bowman	Rio de Janeiro	1400	26	39	Latossolo	Média	4.9	Floresta Plantada
Zaia et al.	2008 a	Bowman	Rio de Janeiro	1400	26	39	Latossolo	Média	4.9	Pastagem
Zaia et al.	2008 a	Bowman	Rio de Janeiro	1400	26	39	Latossolo	Argilosa	4.3	Vegetação Nativa
Oliveira et al.	2014	Bowman	Mato Grosso do Sul	931	26	114	Chernossolo	Argilosa	7.3	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	1092	23	36	Chernossolo	Média	7.4	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	1092	23	36	Chernossolo	Média	7.2	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	1085	22	485	Chernossolo	Média	6.9	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	1085	22	485	Chernossolo	Média	6.9	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	1270	22	345	Chernossolo	Média	6.7	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	1270	22	345	Chernossolo	Média	6.6	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	1225	23.1	108	Chernossolo	Arenosa	7.5	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	1085	23	372	Chernossolo	Média	8.2	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio Grande do Sul	1510	17.6	212	Chernossolo	Argilosa	6.1	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Santa Catarina	460.6	26	409	Chernossolo	Média	7.2	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Santa Catarina	460.6	26	409	Chernossolo	Argilosa	6.0	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Bahia	919	25	36	Latossolo	Arenosa	3.7	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Bahia	919	25	36	Latossolo	Média	5.3	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Espírito Santo	1277	23.8	33	Latossolo	Média	6.1	NA

Oliveira et al.	2014	Bowman	São Paulo	NA	NA	NA	Latossolo	Argilosa	5.3	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	São Paulo	NA	NA	NA	Latossolo	Argilosa	5.2	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	2174	18.1	846	Latossolo	Argilosa	4.4	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	2174	18.1	846	Latossolo	Argilosa	4.5	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	1400	23.2	4	Latossolo	Média	5.8	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	1617	17.5	986	Latossolo	Média	5.0	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	1617	17.5	986	Latossolo	Média	5.6	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio Grande do Sul	2087	16.7	850	Latossolo	Argilosa	4.7	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio Grande do Sul	2087	16.7	850	Latossolo	Argilosa	4.8	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio Grande do Sul	1823	15.1	1031	Latossolo	Argilosa	4.1	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio Grande do Sul	2012	16	837	Latossolo	Média	4.8	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	São Paulo	1409	19.9	710	Latossolo	Média	3.6	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Santa Catarina	1400	16	916	Latossolo	Argilosa	4.6	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio de Janeiro	1617	17.5	986	Organossolo	NA	4.8	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio Grande do Sul	1916	19.1	983	Organossolo	NA	4.0	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Mato Grosso do Sul	1638	21.6	305	Organossolo	NA	4.4	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Paraná	1643	16.7	933	Organossolo	NA	4.4	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio Grande do Sul	1700	15	978	Organossolo	NA	5.4	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio Grande do Sul	1566	18.5	36	Organossolo	NA	3.0	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio Grande do Sul	1566	18.5	36	Organossolo	NA	3.7	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	Rio Grande do Sul	1566	18.5	36	Organossolo	NA	3.5	NA

Oliveira et al.	2014	Bowman	Santa Catarina	1549	19.1	144	Organossolo	NA	4.6	NA
Oliveira et al.	2014	Bowman	São Paulo	1409	19.9	710	Organossolo	NA	5.2	NA
Costa	2015	Bowman	São Paulo	1262	21.6	618	Neossolo	Média	4.0	Floresta Plantada
Costa	2015	Bowman	São Paulo	1210	20.1	728	Latossolo	Argilosa	3.9	Floresta Plantada
Costa	2015	Bowman	São Paulo	1210	20.1	728	Latossolo	Muito Argilosa	4.4	Floresta Plantada
Costa	2015	Bowman	São Paulo	1210	20.1	728	Cambissolo	Média	4.1	Floresta Plantada
Costa	2015	Bowman	São Paulo	1287	21.3	566	Argissolo	Muito Argilosa	4.0	Floresta Plantada
Costa	2015	Bowman	São Paulo	1174	20.4	673	Latossolo	Argilosa	4.9	Floresta Plantada
Costa	2015	Bowman	São Paulo	1170	21.6	586	Latossolo	Média	3.9	Floresta Plantada
Costa	2015	Bowman	São Paulo	1302	20.2	828	Neossolo	Arenosa	4.0	Floresta Plantada
Costa	2015	Bowman	São Paulo	1249	20.8	624	Latossolo	Argilosa	4.1	Floresta Plantada
Costa	2015	Bowman	São Paulo	1308	19.9	841	Latossolo	Média	4.6	Floresta Plantada
Costa	2015	Bowman	São Paulo	1517	20.7	889	Neossolo	Arenosa	4.3	Floresta Plantada
Zaia	2008 b	Bowman	Bahia	1500	26	108	Latossolo	Argilosa	3.8	Vegetação Nativa
Zaia	2008 b	Bowman	Bahia	1500	26	108	Latossolo	Média	4.6	Agrofloresta
Zaia	2008 b	Bowman	Bahia	1500	26	108	Latossolo	Argilosa	4.9	Agrofloresta
Zaia	2008 b	Bowman	Bahia	1500	26	108	Latossolo	Média	5.4	Agrofloresta
Zaia	2008 b	Bowman	Bahia	1500	26	108	Cambissolo	Média	5.9	Agrofloresta
Zaia	2008 b	Bowman	Bahia	1500	26	108	Cambissolo	Arenosa	6.0	Agrofloresta
Cunha et al.	2007	Bowman	Rio de Janeiro	1444	20	900	Cambissolo	Média	4.1	Vegetação Nativa
Cunha et al.	2007	Bowman	Rio de Janeiro	1444	20	600	Cambissolo	Média	3.8	Vegetação Nativa

Cunha et al.	2007	Bowman	Rio de Janeiro	1444	20	250	Cambissolo	Média	4.4	Floresta Plantada
Cunha et al.	2007	Bowman	Rio de Janeiro	1444	20	900	Cambissolo	Média	4.3	Pastagem
Cunha et al.	2007	Bowman	Rio de Janeiro	1444	20	600	Latossolo	Média	4.2	Pastagem
Cunha et al.	2007	Bowman	Rio de Janeiro	1444	20	250	Latossolo	Média	4.5	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Distrito Federal	1443	21.9	1172	Neossolo	Arenosa	4.9	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Rio de Janeiro	1623	23	15	Planossolo	Arenosa	5.6	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Rio de Janeiro	1640	19	60	Argissolo	Arenosa	5.8	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Rio de Janeiro	1623	23	15	Argissolo	Média	4.5	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Rio de Janeiro	503	23.3	275	Argissolo	Média	4.3	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Rio de Janeiro	1022	25	173	Argissolo	Média	4.9	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Rio de Janeiro	2174	18.1	846	Argissolo	Argilosa	4.4	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Rio de Janeiro	1252	23.6	7	Chernossolo	Média	5.4	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Rio de Janeiro	503	23.3	275	Argissolo	Média	4.0	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Rio de Janeiro	1594	21.4	387	Argissolo	Argilosa	3.8	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Rio de Janeiro	1392	22	5	Latossolo	Argilosa	4.0	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Rio de Janeiro	1280	21.1	390	Latossolo	Argilosa	3.3	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Rio de Janeiro	1022	25	173	Latossolo	Argilosa	4.0	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Minas Gerais	1530	19.4	919	Latossolo	Argilosa	3.9	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Rio de Janeiro	2174	19.9	574	Latossolo	Argilosa	4.1	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Minas Gerais	1530	19.4	919	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Pastagem
Guerra et al.	1996	Bowman	Minas Gerais	1530	19.4	919	Latossolo	Muito Argilosa	4.5	Pastagem
Duda	2000	Bowman	Rio de Janeiro	1623	23	15	Organossolo	Muito Argilosa	4.5	Pastagem



Duda	2000	Bowman	Rio de Janeiro	1292	26.5	2	Gleissolo	Argilosa	4.5	Pastagem
Duda	2000	Bowman	Minas Gerais	2200	18.3	933	Neossolo	Média	4.5	Vegetação Nativa
Duda	2000	Bowman	Rio de Janeiro	1092	23	36	Chernossolo	Argilosa	7.4	Pastagem
Duda	2000	Bowman	Rio de Janeiro	1704	23.4	695	Cambissolo	Argilosa	4.5	Vegetação Nativa
Duda	2000	Bowman	Minas Gerais	2200	18.3	933	Cambissolo	Média	4.5	Vegetação Nativa
Duda	2000	Bowman	Rio de Janeiro	2174	18.1	846	Cambissolo	Média	3.9	Floresta Plantada
Duda	2000	Bowman	Minas Gerais	1960	18.9	1100	Cambissolo	Argilosa	4.8	Floresta Plantada
Duda	2000	Bowman	Rio de Janeiro	1292	26.5	2	Planossolo	Arenosa	4.8	Pastagem
Duda	2000	Bowman	Rio de Janeiro	1252	23.6	7	Chernossolo	Argilosa	5.4	Pastagem
Duda	2000	Bowman	Pernambuco	795	24.9	89	Chernossolo	Média	4.8	Sistema Convencional
Duda	2000	Bowman	Minas Gerais	1572	19.2	1143	Argissolo	Argilosa	4.7	Pastagem
Duda	2000	Bowman	Rio de Janeiro	1215	20	391	Argissolo	Argilosa	7.8	Pastagem
Duda	2000	Bowman	Pernambuco	988	25.4	58	Argissolo	Argilosa	4.6	Sistema Convencional
Duda	2000	Bowman	Rio de Janeiro	1292	26.5	2	Argissolo	Média	5.7	Pastagem
Duda	2000	Bowman	Pernambuco	795	24.9	184	Argissolo	Arenosa	5.0	Sistema Convencional
Duda	2000	Bowman	Rio de Janeiro	1292	26.5	2	Argissolo	Argilosa	4.9	Pastagem
Duda	2000	Bowman	Rio de Janeiro	2280	22	54	Argissolo	Argilosa	5.0	Pastagem
Duda	2000	Bowman	Pernambuco	797	23.3	4	Nitossolo	Muito Argilosa	4.1	Sistema Convencional
Duda	2000	Bowman	Paraná	1726	22.4	410	Nitossolo	Argilosa	5.7	Sistema Convencional
Duda	2000	Bowman	Minas Gerais	1617	19.7	832	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Pastagem
Duda	2000	Bowman	Rio de Janeiro	2174	19.9	574	Latossolo	Argilosa	4.8	Pastagem



Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Gatiboni et al.	2007	Hedley	Rio Grande do Sul	1987	20.1	277	Latossolo	Muito Argilosa	4.6	Plantio Direto
Lehmann et al.	2001	Hedley	Amazonas	2362	27.4	92	Latossolo	Argilosa	4.5	Agrofloresta
Lehmann et al.	2001	Hedley	Amazonas	2362	27.4	92	Latossolo	Argilosa	4.5	Agrofloresta
Lehmann et al.	2001	Hedley	Amazonas	2362	27.4	92	Latossolo	Argilosa	4.5	Agrofloresta
Lehmann et al.	2001	Hedley	Amazonas	2362	27.4	92	Latossolo	Argilosa	4.5	Agrofloresta
Lehmann et al.	2001	Hedley	Amazonas	2362	27.4	92	Latossolo	Argilosa	4.5	Agrofloresta

Lehmann et al.	2001	Hedley	Amazonas	2362	27.4	92	Latossolo	Argilosa	4.5	Agrofloresta
Lehmann et al.	2001	Hedley	Amazonas	2362	27.4	92	Latossolo	Argilosa	4.5	Agrofloresta
Lehmann et al.	2001	Hedley	Amazonas	2362	27.4	92	Latossolo	Argilosa	4.5	Agrofloresta
Lehmann et al.	2001	Hedley	Amazonas	2362	27.4	92	Latossolo	Argilosa	4.5	Agrofloresta
Aleixo et al.	2017	Hedley	Bahia	1500	25	85	Argissolo	Argilosa	4.1	Agrofloresta
Aleixo et al.	2017	Hedley	Bahia	1500	25	85	Argissolo	Argilosa	4.5	Agrofloresta
Aleixo et al.	2017	Hedley	Bahia	1500	25	85	Argissolo	Muito Argilosa	4.5	Agrofloresta
Aleixo et al.	2017	Hedley	Bahia	1500	25	85	Argissolo	Muito Argilosa	4.0	Agrofloresta
Aleixo et al.	2017	Hedley	Bahia	1500	25	85	Argissolo	Argilosa	4.5	Agrofloresta
Aleixo et al.	2017	Hedley	Bahia	1500	25	85	Argissolo	Argilosa	4.8	Agrofloresta
Aleixo et al.	2017	Hedley	Bahia	1500	25	85	Argissolo	Argilosa	4.6	Pastagem
Aleixo et al.	2017	Hedley	Bahia	1500	25	85	Argissolo	Muito Argilosa	4.5	Vegetação Nativa
Costa et al.	2015	Hedley	São Paulo	1262	21.6	618	Neossolo	Média	4.0	Floresta Plantada
Costa et al.	2015	Hedley	São Paulo	1210	20.1	728	Latossolo	Argilosa	3.9	Floresta Plantada
Costa et al.	2015	Hedley	São Paulo	1210	20.1	728	Latossolo	Muito Argilosa	4.4	Floresta Plantada
Costa et al.	2015	Hedley	São Paulo	1210	20.1	728	Cambissolo	Média	4.1	Floresta Plantada
Costa et al.	2015	Hedley	São Paulo	1287	21.3	566	Argissolo	Muito Argilosa	4.0	Floresta Plantada
Costa et al.	2015	Hedley	São Paulo	1170	21.6	586	Latossolo	Média	3.9	Floresta Plantada
Costa et al.	2015	Hedley	São Paulo	1302	20.2	828	Neossolo	Arenosa	4.0	Floresta Plantada
Costa et al.	2015	Hedley	São Paulo	1249	20.8	624	Latossolo	Argilosa	4.1	Floresta Plantada
Costa et al.	2015	Hedley	São Paulo	1308	19.9	841	Latossolo	Média	4.6	Floresta Plantada
Costa et al.	2015	Hedley	São Paulo	1517	20.7	889	Neossolo	Arenosa	4.3	Floresta Plantada

Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Mato Grosso do Sul	931	26	114	Chernossolo	Argilosa	7.3	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio de Janeiro	1092	23	36	Chernossolo	Média	7.4	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio de Janeiro	1092	23	36	Chernossolo	Média	7.2	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio de Janeiro	1085	22	485	Chernossolo	Média	6.9	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio de Janeiro	1085	22	485	Chernossolo	Média	6.9	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio de Janeiro	1270	22	345	Chernossolo	Média	6.7	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio de Janeiro	1270	22	345	Chernossolo	Média	6.6	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio de Janeiro	1225	23.1	108	Chernossolo	Arenosa	7.5	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio de Janeiro	1085	23	372	Chernossolo	Média	8.2	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio Grande do Sul	1510	17.6	212	Chernossolo	Argilosa	6.1	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Santa Catarina	460.6	26	409	Chernossolo	Média	7.2	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Santa Catarina	460.6	26	409	Chernossolo	Argilosa	6.0	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Bahia	919	25	36	Latossolo	Arenosa	3.7	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Bahia	919	25	36	Latossolo	Média	5.3	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Espírito Santo	1277	23.8	33	Latossolo	Média	6.1	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	São Paulo	NA	NA	NA	Latossolo	Argilosa	5.3	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	São Paulo	NA	NA	NA	Latossolo	Argilosa	5.2	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio de Janeiro	2174	18.1	846	Latossolo	Argilosa	4.4	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio de Janeiro	2174	18.1	846	Latossolo	Argilosa	4.5	NA

Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio de Janeiro	1400	23.2	4	Latossolo	Média	5.8	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio de Janeiro	1704	23.4	695	Latossolo	Média	5.0	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio de Janeiro	1704	23.4	695	Latossolo	Média	5.6	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio Grande do Sul	2087	16.7	850	Latossolo	Argilosa	4.7	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio Grande do Sul	2087	16.7	850	Latossolo	Argilosa	4.8	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio Grande do Sul	1823	15.1	1031	Latossolo	Argilosa	4.1	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Rio Grande do Sul	2012	16	837	Latossolo	Média	4.8	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	São Paulo	1360	21	580	Latossolo	Média	3.6	NA
Dados NP (Rinaldi)	2019	Hedley	Santa Catarina	1400	16	916	Latossolo	Argilosa	4.6	NA
Viana et al.	2017	Hedley	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Arenosa	4.2	Vegetação Nativa
Viana et al.	2017	Hedley	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Arenosa	4.1	Pastagem
Viana et al.	2017	Hedley	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Média	3.8	Floresta Plantada
Viana et al.	2017	Hedley	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Argilosa	4.5	Vegetação Nativa
Viana et al.	2017	Hedley	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Argilosa	4.3	Pastagem
Viana et al.	2017	Hedley	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Argilosa	3.7	Floresta Plantada
Viana et al.	2017	Hedley	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Argilosa	3.4	Agrofloresta
Viana et al.	2017	Hedley	Bahia	2000	25	40	Argissolo	Argilosa	3.5	Agrofloresta
Viana et al.	2017	Hedley	Bahia	1528	24.8	52	Nitossolo	Argilosa	5.6	Agrofloresta
Viana et al.	2017	Hedley	Bahia	1528	24.8	52	Nitossolo	Argilosa	5.7	Agrofloresta
Viana et al.	2017	Hedley	Bahia	1528	24.8	52	Nitossolo	Argilosa	5.5	Agrofloresta
Araújo et al.	2004	Hedley	Pernambuco	585	25.7	26	Latossolo	Arenosa	6.0	Vegetação Nativa

Araújo et al.	2004	Hedley	Pernambuco	585	25.7	26	Latossolo	Média	5.9	Vegetação Nativa
Araújo et al.	2004	Hedley	Pernambuco	585	25.7	26	Latossolo	Média	6.0	Vegetação Nativa
Araújo et al.	2004	Hedley	Pernambuco	580	26	392	Luvissolo	Arenosa	6.4	Vegetação Nativa
Araújo et al.	2004	Hedley	Pernambuco	580	26	392	Luvissolo	Arenosa	6.4	Vegetação Nativa
Araújo et al.	2004	Hedley	Pernambuco	580	26	392	Luvissolo	Arenosa	6.4	Vegetação Nativa
Lilienfein et al.	2000	Hedley	Minas Gerais	1500	23	863	Latossolo	Muito Argilosa	4.7	Sistema Convencional
Lilienfein et al.	2000	Hedley	Minas Gerais	1500	23	863	Latossolo	Muito Argilosa	4.9	Pastagem
Lilienfein et al.	2000	Hedley	Minas Gerais	1500	23	863	Latossolo	Muito Argilosa	5.4	Pastagem
Lilienfein et al.	2000	Hedley	Minas Gerais	1500	23	863	Latossolo	Muito Argilosa	5.1	Floresta Plantada
Lilienfein et al.	2000	Hedley	Minas Gerais	1500	23	863	Latossolo	Muito Argilosa	4.7	Floresta Plantada
Lilienfein et al.	2000	Hedley	Minas Gerais	1500	23	863	Latossolo	Muito Argilosa	5.7	Sistema Convencional
Lilienfein et al.	2000	Hedley	Minas Gerais	1500	23	863	Latossolo	Muito Argilosa	5.9	Plantio Direto
Lilienfein et al.	2000	Hedley	Minas Gerais	1500	23	863	Latossolo	Muito Argilosa	6.1	Sistema Convencional
Soltangheisi et al.	2019	Hedley	Pará	2613	23	51	Latossolo	Muito Argilosa	NA	Floresta Plantada
Soltangheisi et al.	2019	Hedley	Pará	2613	23	51	Latossolo	Muito Argilosa	NA	Pastagem
Soltangheisi et al.	2019	Hedley	Pará	2613	23	51	Argissolo	Arenosa	NA	Floresta Plantada
Soltangheisi et al.	2019	Hedley	Pará	2613	23	51	Argissolo	Média	NA	Pastagem
Quesada et al.	2010	Hedley	Mato Grosso	2268	25.87	283	Argissolo	Arenosa	4.6	Vegetação Nativa
Quesada et al.	2010	Hedley	Amazonas	2856	25.38	41	Argissolo	Arenosa	4	Vegetação Nativa
Quesada et al.	2010	Hedley	Amazonas	2856	25.38	46	Argissolo	Média	3.9	Vegetação Nativa
Quesada et al.	2010	Hedley	Acre	2192	25.89	243	Cambissolo	Argilosa	5.9	Vegetação Nativa







Lugli et al.	2019	Hedley	Amazonas	2400	26	92	Latossolo	Arenosa	NA	Vegetação Nativa
Lugli et al.	2019	Hedley	Amazonas	2400	26	92	Latossolo	Arenosa	NA	Vegetação Nativa
Lugli et al.	2019	Hedley	Amazonas	2400	26	92	Latossolo	Arenosa	NA	Vegetação Nativa
Lugli et al.	2019	Hedley	Amazonas	2400	26	92	Latossolo	Arenosa	NA	Vegetação Nativa
Kuczak et al.	2006	Hedley	Amazonas	2500	26.2	92	Latossolo	NA	4.8	Agrofloresta
Kuczak et al.	2006	Hedley	Amazonas	2500	26.2	92	Latossolo	NA	4.9	Pastagem
Kuczak et al.	2006	Hedley	Amazonas	2500	26.2	92	Latossolo	NA	4.7	Vegetação Nativa
Cherubin et al.	2016	Hedley	Goiás	1600	24	800	Latossolo	Média	3.8	Vegetação Nativa
Cherubin et al.	2016	Hedley	Goiás	1600	24	800	Nitossolo	Arenosa	3.7	Pastagem
Cherubin et al.	2016	Hedley	Goiás	1600	24	800	Latossolo	Argilosa	5.1	Sistema Convencional
Cherubin et al.	2016	Hedley	São Paulo	1240	23.4	425	Latossolo	Média	6.5	Vegetação Nativa
Cherubin et al.	2016	Hedley	São Paulo	1240	23.4	425	Nitossolo	Média	4.0	Pastagem
Cherubin et al.	2016	Hedley	São Paulo	1240	23.4	425	Latossolo	Média	5.3	Sistema Convencional
Cherubin et al.	2016	Hedley	São Paulo	1470	21.7	630	Latossolo	Muito Argilosa	3.0	Vegetação Nativa
Cherubin et al.	2016	Hedley	São Paulo	1470	21.7	630	Nitossolo	Argilosa	4.7	Pastagem
Cherubin et al.	2016	Hedley	São Paulo	1470	21.7	630	Latossolo	Muito Argilosa	5.5	Sistema Convencional
Tiecher et al.	2012 a;b	Hedley	Paraná	2110	18.8	700	Latossolo	Argilosa	5.6	Plantio Direto
Tiecher et al.	2012 a;b	Hedley	Paraná	2110	18.8	700	Latossolo	Argilosa	5.1	Sistema Convencional
Tiecher et al.	2012 a;b	Hedley	Paraná	2110	18.8	700	Latossolo	Argilosa	4.5	Vegetação Nativa
Xavier et al.	2009	Hedley	Ceará	640	28	850	NA	Arenosa	5.1	Plantio Direto
Xavier et al.	2009	Hedley	Ceará	640	28	850	NA	Arenosa	5.1	Plantio Direto

Xavier et al.	2009	Hedley	Ceará	640	28	850	NA	Arenosa	4.6	Vegetação Nativa
Rodrigues et al.	2015	Hedley	Mato Grosso do Sul	1950	24.8	790	Latossolo	Muito Argilosa	5.5	Plantio Direto
Rodrigues et al.	2015	Hedley	Mato Grosso do Sul	1950	24.8	790	Latossolo	Muito Argilosa	5.3	Sistema Convencional
Rodrigues et al.	2015	Hedley	Mato Grosso do Sul	1950	24.8	790	Latossolo	Muito Argilosa	4.5	Vegetação Nativa
Rodrigues et al.	2015	Hedley	Mato Grosso	2150	23.5	640	Latossolo	Argilosa	4.8	Plantio Direto
Rodrigues et al.	2015	Hedley	Mato Grosso	2150	23.5	640	Latossolo	Argilosa	4.8	Sistema Convencional
Rodrigues et al.	2015	Hedley	Mato Grosso	2150	23.5	640	Latossolo	Argilosa	3.9	Vegetação Nativa
Rodrigues et al.	2015	Hedley	Goiás	1600	24	980	Latossolo	Muito Argilosa	5.1	Plantio Direto
Rodrigues et al.	2015	Hedley	Goiás	1600	24	980	Latossolo	Muito Argilosa	5.2	Sistema Convencional
Rodrigues et al.	2015	Hedley	Goiás	1600	24	980	Latossolo	Muito Argilosa	4.1	Vegetação Nativa
Rodrigues et al.	2015	Hedley	Maranhão	1480	26.5	610	Latossolo	Média	4.7	Plantio Direto
Rodrigues et al.	2015	Hedley	Maranhão	1480	26.5	610	Latossolo	Média	4.5	Sistema Convencional
Rodrigues et al.	2015	Hedley	Maranhão	1480	26.5	610	Latossolo	Média	3.8	Vegetação Nativa
Brunetto et al.	2013	Hedley	Rio Grande do Sul	1400	18.2	208	Argissolo	Arenosa	4.0	Pastagem
Brunetto et al.	2013	Hedley	Rio Grande do Sul	1400	18.2	208	Argissolo	Arenosa	6.6	Sistema Convencional
Brunetto et al.	2013	Hedley	Rio Grande do Sul	1400	18.2	208	Argissolo	Arenosa	6.4	Sistema Convencional
Schmitt et al.	2013	Hedley	Rio Grande do Sul	1400	18.2	208	Argissolo	Arenosa	4.0	Pastagem
Schmitt et al.	2013	Hedley	Rio Grande do Sul	1400	18.2	208	Argissolo	Arenosa	5.9	Sistema Convencional
Schmitt et al.	2013	Hedley	Rio Grande do Sul	1400	18.2	208	Argissolo	Arenosa	6.0	Sistema Convencional
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1380	22.4	930	Latossolo	NA	4.8	Floresta Plantada

Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1380	22.4	930	Latossolo	NA	5.2	Pastagem
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1374	23.5	280	Latossolo	NA	4.5	Floresta Plantada
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1374	23.5	280	Latossolo	NA	4.9	Pastagem
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1046	23.1	850	Latossolo	NA	4.4	Floresta Plantada
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1046	23.1	850	Latossolo	NA	4.9	Pastagem
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1551	20.4	750	Cambissolo	NA	4.5	Floresta Plantada
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1551	20.4	750	Cambissolo	NA	5.3	Pastagem
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1422	20.2	870	Latossolo	NA	4.9	Floresta Plantada
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1422	20.2	870	Latossolo	NA	5.1	Pastagem
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1380	22.4	930	Latossolo	NA	4.9	Floresta Plantada
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1380	22.4	930	Latossolo	NA	5.3	Vegetação Nativa
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1374	23.5	280	Latossolo	NA	4.1	Floresta Plantada
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1374	23.5	280	Latossolo	NA	4.3	Vegetação Nativa
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1046	23.1	850	Latossolo	NA	4.3	Floresta Plantada
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1046	23.1	850	Latossolo	NA	4.6	Vegetação Nativa
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1551	20.4	750	Cambissolo	NA	4.5	Floresta Plantada
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1551	20.4	750	Cambissolo	NA	4.5	Vegetação Nativa
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1422	20.2	870	Latossolo	NA	4.7	Floresta Plantada
Leite	2001	Hedley	Minas Gerais	1422	20.2	870	Latossolo	NA	5.2	Vegetação Nativa

---

NA = Não adicionado ; Prec = Precipitação; T = Temperatura; Alt = Altitude

### 3.2 CONTRIBUIÇÃO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS NOS TEORES DE FÓSFORO ORGÂNICO DO SOLO NO BRASIL: UMA META-ANÁLISE

#### RESUMO

Acredita-se que sistemas de florestas plantadas (SF) podem aumentar o teor de fósforo orgânico do solo ( $P_o$ ) devido à sua alta produção de biomassa vegetal, que se traduz em uma grande quantidade de resíduos vegetais ricos em  $P_o$  que contribuem para o aporte e acúmulo de material para a ciclagem de nutrientes em solos sob esses sistemas de manejo. O SF é de interesse mundial no contexto da promoção de sumidouros de  $P_o$  e da diminuição do uso de fertilizantes inorgânicos e preservação do agroecossistema, bem como dos recursos naturais limitados, as reservas fosfatadas. Apoiados nessa hipótese de que sistemas florestais aumentam os teores de  $P_o$  do solo e que solos argilosos possuem maiores concentrações de  $P_o$ , esta pesquisa foi realizada com o objetivo de quantificar a contribuição relativa de  $P_o$  do solo de árvores em SF e diferentes classes texturais. Para isso, este estudo avaliou as diferenças relatadas nos teores  $P_o$  em sistemas florestais em comparação com outros sistemas de uso da terra (pastagens ou mata), em várias classes de solos, na profundidade de 0-10 cm no Brasil. Usando modelos de efeitos fixos e uma abordagem meta-analítica, foram sintetizados dados de seis estudos revisados gerando 55 pontos de dados (sítios) que atenderam às premissas para esta meta-análise. Comparando Sistemas florestais vs. Mata ou Sistemas florestais vs. Pastagens, os teores de  $P_o$  sob SF foram maiores em 105% comparado às matas, 50% em relação a pastagem e 8 % de acréscimo na comparação matas vs. pastagem. Os tamanhos de efeito foram

superiores a 1, relatando a eficiência do SAF em aumentar os teores de  $P_o$  em todas as comparações. Em geral, as florestas plantadas contribuem significativamente para as mudanças positivas no teor de  $P_o$  do solo. Os resultados sugerem que há um declínio no teor de  $P_o$  durante as mudanças no uso da terra na sequência: Sistemas de florestas plantadas > Mata > Pastagem. Também foi observada influência da textura argilosa no aumento dos teores de  $P_o$ . O importante resultado desta meta-análise é mostrar que os SF devem ser considerados como uma alternativa na adaptação às mudanças de usos da terra e como estratégias necessárias para redução do uso de fertilizantes inorgânicos e aproveitamento de  $P_o$  por meio da sua mineralização e ciclagem de nutrientes.

Termos para indexação: Fósforo Orgânico, Solo, Brasil, Sistemas florestais, Floresta Natural, Pastagem.

## INTRODUÇÃO

A preocupação com a sustentabilidade do ecossistema após anos de crises climáticas e problemas socioambientais vêm sendo retratados por meio da perspectiva dos serviços ecossistêmicos. A visão do ecossistema sob a ótica dos serviços nas agendas políticas tem visado o planejamento de ações futuras (Embrapa, 2021).

A crescente preocupação com o manejo adequado da adubação fosfatada nos solos é essencial visto que o fósforo (P) é um elemento chave no solo, sendo um limitador do desenvolvimento e da produtividade das culturas, quando em déficit (Bünemann, 2015). No Brasil, os solos apresentam baixos teores de P inorgânico, prontamente disponíveis para as plantas. Além da baixa fertilidade natural dos solos brasileiros, suas características químicas e mineralógicas, com elevados teores de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, propiciam a fixação do P adicionado via fertilizantes, e seu pH baixo favorecendo a precipitação de P como fosfatos de Fe e Al, acarretando em baixos teores de P na solução do solo (Novais et al., 2007).

Podem ser atribuídas ao solo as características de adicionador ou diminuidor do nutriente P. Em solos brasileiros, especialmente na região originalmente ocupada

pelo bioma Cerrado, a elevada intemperização do solo acarreta em características como maior eletropositividade, aumento de adsorção aniônica, menor capacidade de troca de cátions, dentre outros, que o evidenciam como dreno do nutriente na relação solo-planta (Novais e Smyth, 1999). Assim, o uso dos fertilizantes é utilizado em quantidades superiores às que as plantas requerem, pois se estima que somente 10 a 20% do que é aplicado consegue ser absorvido pela cultura, na primeira colheita, sendo o restante retido no solo (P residual) (Liu et al., 2015).

O grau de labilidade do P e suas formas, inorgânica e orgânica, são também dependentes das características do solo. Em geral, solos jovens, quando em pH adequado e em presença de fosfatos em seu material de origem, possuem fosfatos de Ca como principais fornecedores de P aos organismos vivos. Já em solos com alto índice de intemperismo, a ciclagem dos fosfatos orgânicos adquire extrema importância na manutenção da biodisponibilidade.

Segundo Buckwell e Nadeu (2016), na Europa os resíduos desperdiçados representam mais de 40% das quantidades de N e P utilizados nas formas de fertilizantes naturais. Ainda que não suficiente para a obtenção da máxima produtividade econômica das culturas isoladamente (Santos et al., 2008), o P<sub>o</sub> assume papel relevante na sua associação a adubação inorgânica apenas de manutenção no qual o P<sub>o</sub> sustenta a demanda da planta via ciclagem de nutrientes e não há queda de produtividade (Costa, 2015).

Não há uniformidade sobre indicadores práticos para os serviços ecossistêmicos do solo (Rutgers et al., 2012; Baveye et al., 2016). Assim, assumem-se diversas variáveis, sejam elas físicas, químicas ou biológicas, como indicadoras desses serviços (Mafongoya e Sileshi, 2020). Um deles é a capacidade em reciclar os nutrientes na relação solo-planta. Uma das etapas mais importantes da ciclagem de nutrientes é a decomposição da manta orgânica sobre o piso florestal (Haag, 1985).

A avaliação dos diferentes usos da terra como um indicador de serviço ecossistêmico requer um aporte de resultados significativos. A reunião de resultados de diferentes trabalhos foi vista pela primeira vez em 1904 quando Karl Pearson correlacionou os estudos com o intuito de analisar resultados preventivos contra a febre amarela (Pearson, 1904) e desde então essa união de trabalhos vem sendo muito utilizada na área da saúde. Contudo, o uso da meta-análise voltada para a agricultura é recente (Cogo, 2020).

Trabalhos abordando os efeitos do uso de fertilizantes orgânicos, solos e água com implicações na qualidade da água foram resumidos por meio de meta-análise (Darch et al., 2014), bem como a dinâmica do fósforo do solo após arborização (Deng et al., 2017) ou os impactos da arborização nos indicadores de qualidade do solo (Guo et al., 2020).

A preocupação com as reservas fosfatadas apresenta-se em ascensão em todo o mundo com o risco de sua escassez provocar a restrição da produtividade agrícola, principalmente em países tropicais, como o Brasil (Vitousek et al., 2010). Em solos brasileiros, com alto poder de fixação de P, algumas espécies florestais podem ser capazes de utilizar fontes de P menos lábeis e ao mesmo tempo, concomitantemente ao aumento da disponibilidade de P para as culturas agrícolas de maior interesse (Rodgersma e Grierson, 2004) por meio do acúmulo, decomposição e reciclagem do P no sistema solo-planta (Chen et al., 2000).

Outra grande preocupação em relação ao P no solo está diretamente relacionada à maior demanda de exportação dada as incertezas do acesso aos fertilizantes químicos (MacDonald et al., 2011), além de acarretar em maiores custos de produção. O  $P_o$  do solo, quando mineralizado, pode servir de fonte de P para as plantas com ganhos em produtividade por meio do manejo das agroflorestas (Muchane et al., 2020) que possuem alta biodiversidade vegetal e animal contribuindo com a ciclagem de nutrientes.

Acredita-se que o uso da terra seja um influenciador na dinâmica do P no solo, porém, os efeitos sobre o ciclo biogeoquímico do P precisam ser mais estudados (Deng et al., 2017). Assim, questões são levantadas a respeito, como: Os diferentes usos da terra alteram os teores de  $P_o$  presentes no solo? O clima, classe de solo e textura podem alterar o  $P_o$  do solo?

Neste sentido, o objetivo deste artigo é verificar se o manejo do solo com a implantação de sistemas de Florestas Plantadas contribui para o aumento dos teores de  $P_o$  nos solos brasileiros, em diferentes classes e textura do solo. Para isso, utilizou-se a técnica da metanálise. Perspectivas e avanços para pesquisas futuras também foram apontados, sugerindo formas de manejos que auxiliem nos serviços ecossistêmicos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Seleção de dados e categorização



As bases de dados eletrônicas *Scielo*, *Scopus*, *Science Direct*, dissertações e teses desenvolvidas com solos brasileiros foram utilizadas para construir a base de dados, reunindo referências entre os anos de 1990 e 2020. Os seguintes termos de indexação (palavras-chave) foram utilizados para a pesquisa: [Brazil and Phosphorus organic of soil and agroforest]), [Brazil and Phosphorus organic of soil and agroforestry)] e [Brazil and Phosphorus organic of soil and agroforestry and pasture)].

Os dados extraídos foram coletados individualmente em cada publicação considerada apta para meta-análise, coletando-se dados de análises químicas e físicas dos solos, profundidade de coleta, uso da terra, clima e local de coleta, em diferentes regiões do Brasil.

Quando uma publicação incluiu mais de uma variável, cada uma dessas variáveis foi tratada como um experimento independente, e quando a tese ou dissertação apresentou dados publicados em artigos, esses dados foram considerados apenas uma vez. A conclusão deste estudo, a análise e a interpretação foram baseadas em “The PRISMA 2020 statement: na updated guideline for reporting systematic reviews” (Page al., 2021), consistindo em um suporte por meio de diretrizes e checklist.

A fim de reduzir o viés de publicação, os dados foram selecionados de acordo com os seguintes critérios: a) as concentrações de  $P_o$  devem ter sido avaliados para locais de Sistemas Florestas Plantadas (tratamento) e Mata/Pasto (controle); b) a região de amostragem deve ter sido mencionada; c) o tipo de solo deve ter sido informado. Foram selecionados estudos que estimaram o teor de  $P_o$  em camadas superficiais, com profundidades do solo entre 0 – 10 cm. Essa camada de solo foi selecionada porque refletem melhor as profundidades do solo nesses dados e mostram as distribuições mais comuns na literatura. Trabalhos como os de Guo et al. (2020) e Hou et al. (2018) também padronizaram a profundidade em camadas em suas análises.

Foram encontradas um total de 855 pesquisas. Destas, apenas 14 continham as variáveis de interesse para este estudo, porém em seis constavam as variáveis tratamento e controle, concomitantemente. Este valor reduzido se dá pela necessidade de termos as duas variáveis, controle e tratamento, no mesmo trabalho.

## Perguntas e hipóteses de pesquisa

Para testar a hipótese (H) aqui levantada, este estudo se baseou em duas perguntas de pesquisas (Q) com hipóteses associadas testadas. Acredita-se que solos compostos por sistemas florestas plantadas são capazes de aumentar os teores de  $P_0$  e, conseqüentemente, viabilizar a sustentabilidade do agroecossistema, possibilitando diretamente a redução de uso de fertilizantes por meio de um manejo que propicie a ciclagem do  $P_0$  no solo e sua liberação como fonte de nutriente para as plantas. Assim, tem-se:

---

Q1. A floresta plantada aumenta o teor de  $P_0$  do solo?

---

H1 a. A floresta plantada contribui para maiores estoques de  $P_0$  no solo quando comparada ao pasto.

H1 b. Os teores de  $P_0$  do solo não se diferem em função do tipo de manejo atuante sobre o sistema.

---

Q2. Solos argilosos possuem maiores teores de  $P_0$  no solo?

---

H2 a. Solos arenosos retêm menos  $P_0$ .

H2 b.  $P_0$  são adsorvidos nas argilas dos solos e, conseqüentemente, quando em teores elevados, aumentam os estoques de  $P_0$ .

---

## Abordagem meta-analítica

Foi avaliada neste estudo a diferença padronizada das médias dos dados contínuos dos teores de  $P_0$  do solo entre dois grupos de comparação, tratamento e controle, por se tratar de dados extraídos com diferentes extratores e não obedecendo à normalidade. A comparação entre os diferentes usos da terra pela média padronizada dos teores de  $P_0$  do solo é dada pelo  $n$  amostral, média e desvio-padrão de cada estudo. O resultado é obtido pela divisão da diferença das médias dos dois grupos pelo desvio-padrão comum a eles, gerando assim um valor correspondente à diferença em desvios-padrões entre as duas intervenções avaliadas (Guido et al., 2015; Bumaguin, 2016) e o resultado pode ser visualizado pelo gráfico *forest plot*.

No *forest plot* é possível ver um quadrado maior para estudos com resultados mais precisos, ou seja, variâncias menores. A diferença padronizada média (*SMD*) e seu intervalo de confiança de 95% são representados, bem como o peso de cada estudo.

Para analisar as mudanças nos teores de  $P_0$  nas profundidades de 0-10 para Floresta Plantada vs. Mata, Floresta Plantada vs. Pastagem ou Mata vs. Pastagem, foram calculadas as médias padronizadas considerando um estudo =  $k$ , como (eq. 1):

$$\hat{g}k = \left(1 - \frac{3}{4n_k - 9}\right) \frac{\hat{\mu}_{ek} - \hat{\mu}_{ck}}{\sqrt{\left((n_{ek}-1)s_{ek}^2 + (n_{ck}-1)s_{ck}^2\right)}(n_k - 2)} \quad (\text{eq.1})$$

$\hat{g}k$  = Este é o efeito do estudo  $k$  que está sendo analisado. O efeito do estudo é uma estimativa do tamanho do efeito do tratamento ou intervenção que está sendo investigado no estudo  $k$

$n_e = n$  tratamento;  $s_e$  = desvio-padrão do tratamento;  $\mu_e$  = média do tratamento.

$n_c = n$  controle;  $s_c$  = desvio-padrão do controle;  $\mu_c$  = média do controle.

Onde  $n_k = n_{ek} + n_{ck}$  e o fator  $1 - 3/(4n_k - 9)$  corrige o viés do erro-padrão estimado.

A variância é calculada para que seja possível obter o intervalo de confiança por meio da fórmula descrita abaixo (eq. 2):

$$\text{var}(\hat{g}k) = \frac{n_k}{n_{ek} \cdot n_{ck}} + \frac{\hat{g}_k^2}{2(n_k - 3,94)} \quad (\text{eq. 2})$$

E o intervalo de confiança pode então ser calculado por (eq. 3):

$$\hat{g}k \pm z_{1-\frac{\alpha}{2}} S \cdot E(\hat{g}k) \quad (\text{eq. 3})$$

Com erro-padrão (S.E. ( $gk$ )) =  $\sqrt{\text{Var}(\hat{g}k)}$ .

Para avaliar o impacto relativo da do uso da terra como um sistema Floresta Plantada (ou Mata vs. Pastagem) no teor de  $P_O$ , foi considerada a Floresta Plantada como o grupo de tratamento e Mata/Pastagem como o grupo controle. A média padronizada calculada quantificou assim a porcentagem (influência) de diminuição ou aumento de  $P_O$  no solo (sem escala) entre os três sistemas de manejo da terra (Floresta Plantada vs. Mata, Floresta Plantada vs. Pastagem e Mata vs. Pastagem).

Os tamanhos de efeito foram obtidos pelo método  $d$  de Cohen's (Cohen, J. 1988) onde a interpretação é arbitrada em interpretação genérica, sendo: 0 = Sem efeito; entre 0 e 0,3 = Efeito pequeno; 0,3 e 0,8 = Efeito moderado; Acima de 0,8 = Efeito grande, onde a interpretação é dada em valores absolutos, independentemente do resultado ser positivo ou negativo.

A média padronizada para cada observação foi calculada com intervalos de confiança de 95% (IC). Também foram realizados os testes de heterogeneidade pela medida de inconsistência (teste  $I^2$ ), assim como o viés de publicação, verificando a qualidade da análise. As análises foram realizadas com o software R – 4.2.1 (R Core Team, 2022) utilizando o pacote *meta* para explorar, analisar e visualizar os dados.

A Heterogeneidade foi baseada em Higgins et al. (2003), que subjetivamente criaram uma escala de 0 a 100%, divididos em 4 quartis, onde a heterogeneidade vai de inexistente até alta, numa escala crescente de entre os quartis.

### Análise descritiva

A análise descritiva foi usada para avaliar a relação entre as variáveis moderadoras ou covariáveis (usos da terra, classes de solo e textura do solo) e uma variável dependente,  $P_O$  ( $\text{mg kg}^{-1}$ ). Utilizou-se o modelo de efeito aleatório para dados não paramétricos, por meio do teste de *Kruskal-Wallis* e o procedimento de comparação múltipla pelo teste de *Dunn*, para isolar os grupos que diferem dos outros por meio do software *SigmaPlot*.

## RESULTADOS

A meta-análise produziu resultados sobre mudanças no teor de  $P_O$  do solo sob diferentes regiões do Brasil em Floresta Plantada/Mata/Pasto. O número baixo se

justifica pelo representativo volume de trabalhos que atenderam aos critérios de seleção para comparar o teor de  $P_0$  nos solos em sistemas com aumento de árvores.

No total, foi possível obter uma amostragem distribuída pelas macrorregiões do Brasil (exceto a região sul). Estudos sobre P orgânico em comparativo a diferentes usos da terra foram abordados no Pará, Bahia, Goiás, São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Maranhão (Figura 1; Tabela 1).

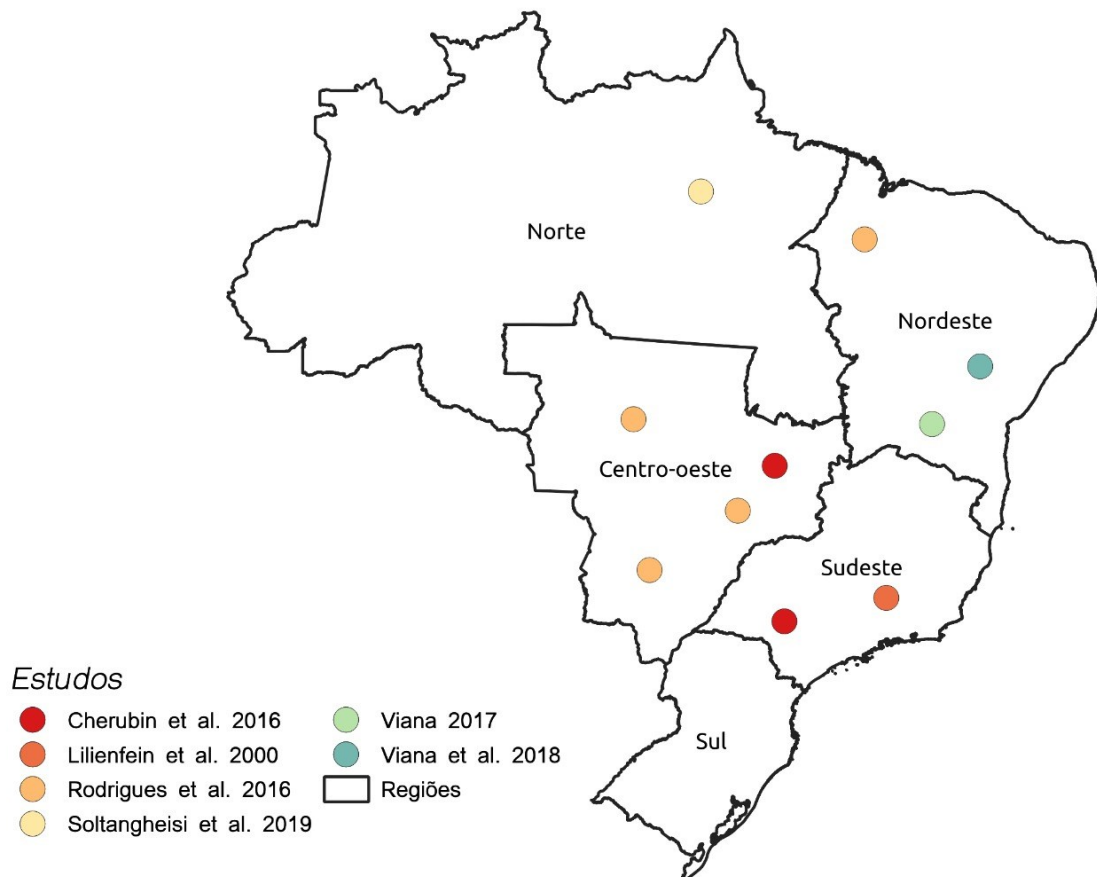


Figura. 1 Distribuição geográfica dos locais incluídos na meta-análise.

Um resumo dos teores de  $P_0$  do solo para todos os sistemas de uso da terra combinados em diferentes trabalhos é apresentado na Tabela 1, com todo grupamento (Tratamento/Controle) contendo Floresta Plantada, Mata e Pastagem, em relação aos teores de  $P_0$  do solo. Além disso, um resumo das diferenças entre os usos da terra, classes de solo e textura podem ser vistos na Figura 6, por meio do boxplot. Outros resultados referentes às comparações intergrupos sobre as diferenças estatísticas, significativas ou não, entre os teores de  $P_0$  e os fatores mencionados anteriormente são apresentados na tabela 2 de acordo com o teste de *Dunn*.

Tabela 1. Características geográficas e Física dos pontos incluídos na meta-análise

<b>Autor</b>	<b>Grupo*</b>	<b>Região</b>	<b>Estado</b>	<b>Textura</b>	<b>Solo</b>
Soltangheisi et al. 2019	M/P	Norte	Pará	Arenosa e Argilosa	Latossolo
Viana et al. 2018	F/M/P	Nordeste	Bahia	Arenosa, Argilosa e Média	Argissolo e Nitossolo
Viana. 2017	F/M/P	Nordeste	Bahia	Arenosa, Argilosa e Média	Argissolo e Nitossolo
Cherubin et al. 2016	M/P	Centro-Oeste e Sudeste	Goiás e São Paulo	Arenosa, Argilosa e Média	Latossolo e Nitossolo
Rodrigues et al. 2016	F/M	Centro-Oeste e Nordeste	Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás e Maranhão	Argilosa, Muito Argilosa e Média	Latossolo
Lilienfein et al. 2000	F/P	Sudeste	Minas Gerais	Muito Argilosa	Latossolo

\* F: Florestas plantadas (Compostas por Seringueira, Açaí, Cacau, Eritrina, Cupuaçu); M: Mata; P: Pastagem.

Obs: O clima em todas as regiões é considerado tropical.

Embora exista uma abordagem ampla de uso sustentável do solo por meio de sistemas de Floresta Plantada, trabalhos que mostram um comparativo entre diferentes sistemas são reduzidos. Ao excluir os trabalhos que não abordaram as três variáveis em questão, simultaneamente, foram realizados o comparativo entre Floresta x Mata (n=3), Floresta x Pastagem (n=3) e Mata x Pastagem (n=4) (Figura 2).

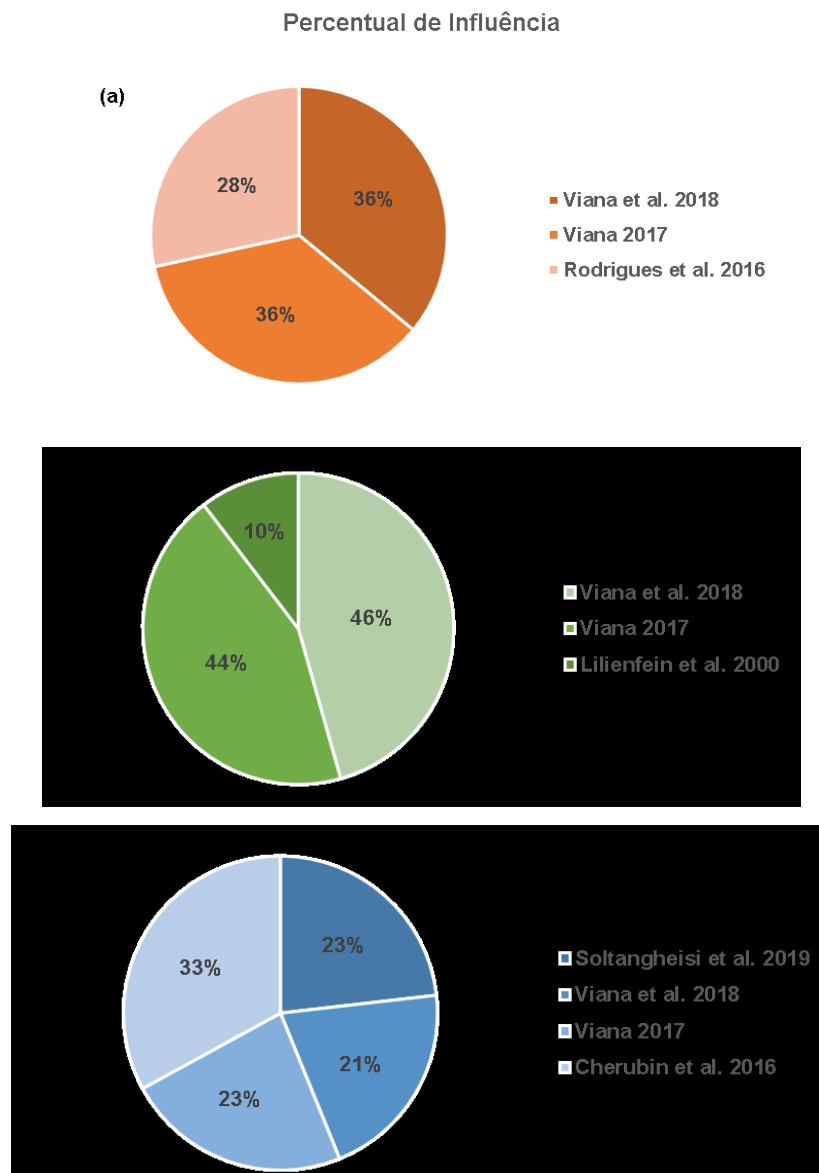


Figura 2. Peso dos estudos (%) na estimativa global gerados a partir dos teores de fósforo orgânico no comparativo entre (a) Floresta vs. Mata, (b) Florestas vs. Pastagem, (c) Mata vs. Pastagem.

## Resultados da Meta-análise

O teste  $I^2$  (medida de inconsistência) foi igual a 0% em todos os modelos (Figura 3, 4 e 5), indicando que o modelo de efeitos fixos é validado com dados padronizados homogêneos.

### Floresta Plantada vs. Mata

No grupo comparativo Floresta Plantada vs. Mata observa-se que os trabalhos de Viana (2017) e Viana et al. (2018) possuem as maiores estimativas pontuais com peso proporcionalmente semelhantes com ~36%, respectivamente (Figura 2). As diferenças médias padronizadas (*SMD*) dos estudos são apresentados na tabela 3. O tamanho do efeito foi maior que 1 para todas as variáveis em estudo (Tabela 2), indicando a significância ( $p = 0.0119$ ) do aumento de árvores, com florestas plantadas, sob os maiores teores de  $P_o$  nos solos. O *SMD* geral foi de 1,54 (CI: 0,52; 2,56), inferindo na colaboração de sistemas de Floresta Plantada em aumentar significativamente o teor de  $P_o$  em comparação à mata, embora os efeitos sejam variáveis de acordo com o estudo considerado (Figura 3). A Floresta Plantada assume aumentos de 67 a 180% de  $P_o$  em relação à mata (Figura 6).



Tabela 2. Variações no tamanho do efeito de aumento de  $P_o$  em diferentes usos da terra

Autor	SDM			SDM			SDM		
	SDM	Li SDM	Ls SDM	SDM	Li SDM	Ls SDM	SDM	Li SDM	Ls SDM
ano	Agro x Mata			Agro x Pasto			Mata x Pasto		
Soltangheisi et al. 2019	-	-	-	-	-	-	0,23	-1,75	2,20
Viana et al. 2018	1,22	-0,48	2,92	1,14	-0,54	2,83	-0,66	-2,76	1,43
Viana 2017	1,27	-0,44	2,98	1,29	-0,42	3,01	0,23	-1,74	2,21
Cherubin et al. 2016	-	-	-	-	-	-	0,59	-1,07	2,24
Rodrigues et al. 2016	2,28	0,36	4,19	-	-	-	-	-	-
Lilienfein et al. 2000	-	-	-	3,57	0,03	7,11	-	-	-

Obs: SMD: Diferença média padronizada; Li: Limite Inferior (-95%); Ls: Limite Superior (+95%)

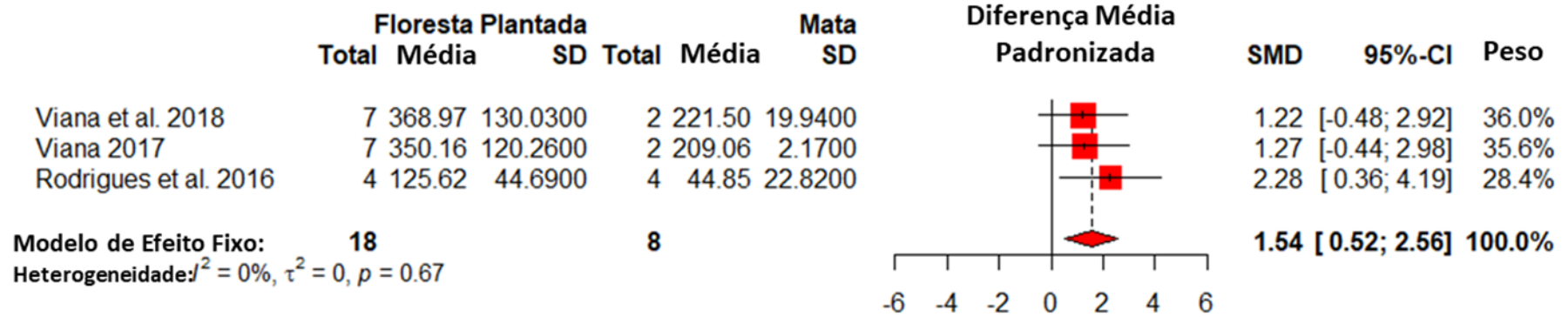


Figura 3. *Forest plot* indicando os valores da média ponderada e seus intervalos de confiança de 95% (C.I) em estudos abordando os teores de fósforo orgânico nos solos com diferentes usos da terra (Floresta Plantada vs. Mata).

## Floresta Plantada vs. Pastagem

Comparando os grupos Floresta Plantada vs. Pastagem os resultados observados mostram que o manejo composto por Floresta Plantada aumenta o teor de  $P_o$  do solo em relação à pastagem (Tabela 2), com aumentos variando de 19 a 70% (Figura 6). O tamanho do efeito de peso foi igual à metanálise Agro vs. Mata, com valores de ~ 46,0, 44,0 e 10,0% para Lilienfein et al. (2000), Viana (2017) e Viana et al. (2018), respectivamente (Figura 2). Na figura 4 é possível verificar o tamanho do efeito em SDM para cada estudo. O tamanho do efeito foi maior que 1 entre as variáveis em estudo, corroborando com o grupo anterior, mostrando que a Floresta Plantada aumenta o teor de P em comparação à pastagem (Tabela 2). O *SMD* geral foi de 1,46 (CI: 0,32; 2,60). Assim, a Floresta Plantada contribuiu significativamente para o aumento de  $P_o$  ( $p = 0,0119$ ).

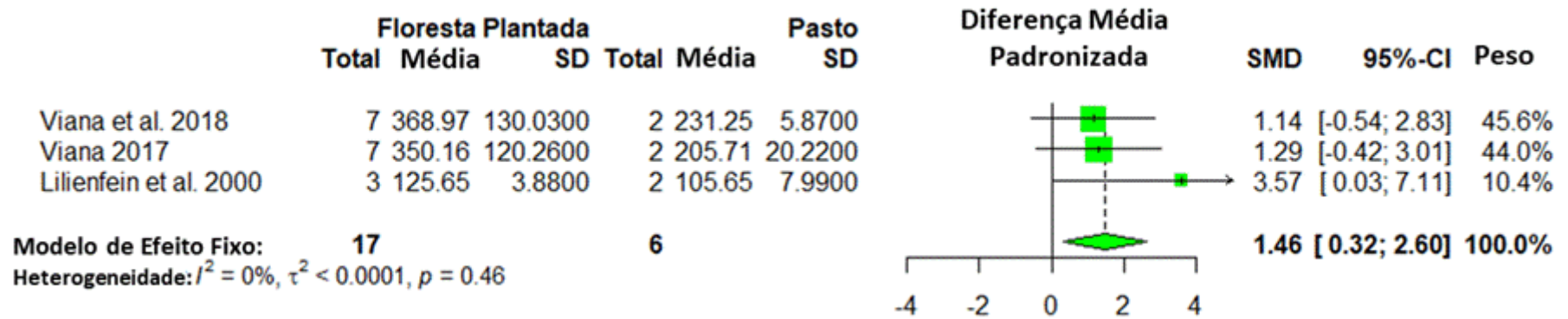


Figura 4. Forest plot indicando os valores da média ponderada e seus intervalos de confiança de 95% (C.I) em estudos abordando os teores de fósforo orgânico nos solos com diferentes usos da terra (Floresta Plantada vs. Pasto).

## Mata vs. Pastagem

A fim de verificar se a mata nativa supera a pastagem na influência direta entre o teor de  $P_o$  nos solos, foi analisado tal grupamento. Constatou-se que o maior peso do tamanho de efeito foi obtido pelo trabalho de Cherubin et al. (2016), com 33,0% (Figura 2). Na figura 5, é possível observar os tamanhos de efeito estimados. A *SMD* geral apresentou estimativa de 0,16 (CI: -0,79; 1,11). Verificou-se, portanto, um aumento discreto com contribuições semelhantes entre os estudos, no qual o tamanho do efeito não ultrapassou 0,7. O tamanho do efeito (*SMD*) apresentou um efeito de superioridade entre a mata (tratamento) e o pasto (controle) para todas os estudos. Porém, os tamanhos de efeito variaram de pequeno a moderado, reiterando a superioridade sutil do aumento no teor de  $P_o$  proporcionado pela mata em comparação às pastagens (Tabela 2).

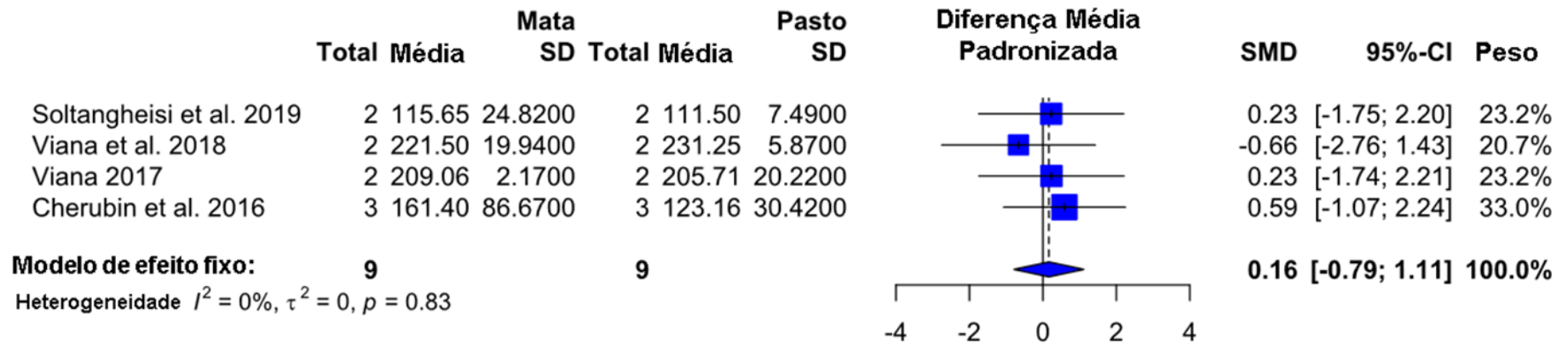


Figura 5. *Forest plot* indicando os valores da média ponderada e seus intervalos de confiança de 95% (I.C) em estudos abordando os teores de fósforo orgânico nos solos com diferentes usos da terra (Mata vs. Pasto).

## Usos da Terra, Classes e Textura do Solo – Análise Descritiva e Boxplot

Os resultados da regressão, individualmente, podem ser vistos na tabela 3. Os SAF 's foram significativos apenas quando comparados à mata. Nas classes de solos foi possível observar uma diferença significativa ao comparar os Latossolos com as demais classes (Argissolos e Nitossolos). Houve diferença significativa ao analisar a textura do solo. Os grupos compostos por textura argilosa vs. média e textura argilosa vs. muito argilosa apresentaram diferenças significativas pelo teste de *Kruskal-Wallis*.

Tabela 3 – Comparações intergrupos do Uso da terra nos teores de  $P_o$  dos solos que obtiveram diferenças significativas detectadas pelo teste de *Kruskal Wallis*

		Grupos			
Usos da Terra	Q	Classes de Solos	Q	Textura do Solo	Q
<b>SAF vs Mata*</b>	2,9	<b>Nitossolo vs Latossolo*</b>	4,2	<b>Argilosa vs Média*</b>	3,4
SAF vs Pastagem	2,4	Nitossolo vs Argissolo	0,4	<b>Argilosa vs Muito Argilosa*</b>	3,8
Pastagem vs Mata	0,3	<b>Argissolo vs Latossolo*</b>	4,5	Argilosa vs Arenosa	1,9
-	-	-	-	Arenosa vs média	1,4

\* diferença estatisticamente significativa pelo Teste de *Dunn* ( $p > 0,05$ ).

As Florestas Plantadas compõem uma mediana de  $236,5 \text{ mg kg}^{-1}$ , enquanto a mata apresentou valores de  $133,2 \text{ mg kg}^{-1}$  e a pastagem de  $121,4 \text{ mg kg}^{-1}$ , conforme esperado (Figura 6). Dentro das classes de solo, a maior mediana no teor de  $P_o$  foi observada em Nitossolos ( $361,23 \text{ mg kg}^{-1}$ ), seguido por Argissolos ( $225,90 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e, por último, Latossolos ( $108,75 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Figura 6). Quando não informada a textura, a mesma foi inferida com base nos teores de argila informados nos artigos. Foi possível obter neste conjunto de dados texturas que variavam de arenosas a muito argilosas. Observa-se que as medianas dos teores de  $P_o$  no solo são superiores nos solos argilosos ( $236,05 \text{ mg kg}^{-1}$ ) seguido de solos arenosos>média>muito argilosos ( $195,24 \text{ mg kg}^{-1}$ ;  $115,60 \text{ mg kg}^{-1}$ ;  $80,16$ , respectivamente) (Figura 6).

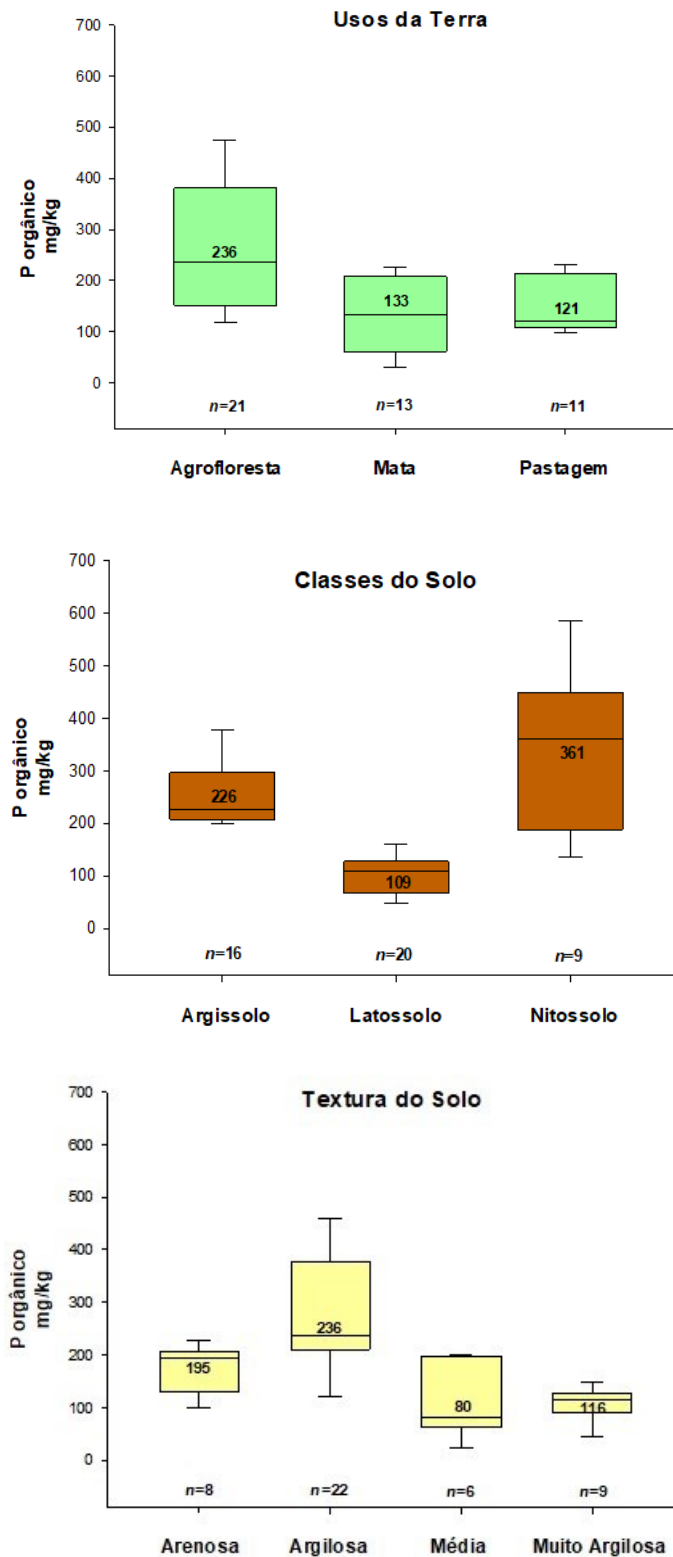


Figura 6. Usos da terra, Classes de Solos e Textura de acordo com os teores de  $P_O$  disponíveis no solo. O limite da caixa mais próximo de zero indica o 1º quartil (25%), uma linha dentro da caixa marca a mediana e o limite da caixa mais distante de zero indica o 3º quartil (75%). Os Bigodes (barras de erro) acima e abaixo da caixa indicam os intervalos de confiança (percentis 90 e 10). n = número de observações.



## DISCUSSÃO

### Meta-análise

Esta meta-análise engloba um conjunto de dados compostos por 6 trabalhos e 55 sítios situados no Brasil cobrindo, comparações entre Floresta Plantada vs. mata e pastagem, detalhando a avaliação quantitativa dos teores de  $P_0$  nos solos. Apesar dos trabalhos terem sido retirados de diferentes estudos, acredita-se que a homogeneidade encontrada entre os grupos analisados se justifica pelo reduzido  $n$  amostral e o uso de médias padronizadas para diminuir a diferença entre os trabalhos. Os dados não possuem viés de publicação, distorção sistemática, e os resultados são confiáveis. Os modelos de efeitos fixos mostraram que o tamanho dos efeitos dos teores de  $P_0$  em Florestas Plantadas foram estatisticamente significativos e superiores a 1, mas com um intervalo de confiança amplo. Tal variação destes dados é reflexo do modelo de pesquisa que unifica diferentes trabalhos em uma única análise estatística (Rey Benayas et al., 2009).

Os sítios avaliados, dentro de cada estudo, não possibilitam confirmar que há influência direta do clima nos teores de  $P_0$ , visto que em todas as amostragens o clima era tropical (Tabela 1) e, ao realizar a análise de subgrupos, não houve diferenças significativas (dados não publicados). Apesar disso, pode-se inferir que o clima tropical se traduz como úmido em sua maior porção e faz com que a água das chuvas transporte dos sistemas de Florestas Plantadas o P presente nas árvores para o solo, contribuindo com o ciclo biogeoquímico.

Os resultados obtidos nesta metanálise responderam satisfatoriamente às hipóteses levantadas, de que a implantação de sistemas de florestas plantadas contribui para o aumento dos teores de  $P_0$  nos solos brasileiros em diferentes classes e textura do solo, permitindo-se concluir que as florestas plantadas aumentam os teores de  $P_0$  nos solos, bem como solos com elevados teores de argila retêm mais  $P_0$ . Esses resultados têm implicações importantes para a gestão de recursos naturais e o planejamento de uso da terra, destacando o papel das florestas plantadas na promoção da fertilidade do solo e na sustentabilidade dos sistemas de Florestas Plantadas.

### Floresta Plantadas vs. Mata/Pastagem (Usos da terra e suas perspectivas)

As análises mostraram que, ao avaliar a introdução de manejos que priorizam o incremento de árvores plantadas, aumentando o aporte de resíduos vegetais na

área, há um aporte significativo de  $P_0$  nas camadas superficiais dos solos, indicando uma vantagem desses sistemas em termos de quantidades de  $P_0$  presentes no solo. Os resultados são semelhantes aos descritos por Muchane et al. (2020), que encontraram evidências de que agroflorestas e maiores aportes de resíduos vegetais podem favorecer os incrementos nos teores de  $P_0$ , embora com aumentos marginais.

A ciclagem do  $P_0$  é favorecida quando se tem um alto aporte de material vegetal, principalmente em regiões de clima tropical. É possível que os maiores teores de  $P_0$  encontrados nas Floresta Plantada, em relação à mata e pastagem, sejam referentes à deposição e translocação deste P do material vegetal enriquecido para o solo (Sanchez, 1976). Mas, como evidenciado, os teores não foram significativos em todos os grupamentos analisados, reforçando a necessidade de insumos químicos para suportar a produção agrícola em ambientes tropicais, bem como o conhecimento dos tipos e qualidade do material vegetal presente nos SAF, que podem variar de acordo com seus estágios de decomposição (Moreira e Siqueira, 2006).

Estudos em todo o mundo destacam o uso do SAF a favor dos serviços ecossistêmicos, como a reciclagem de nutrientes, conservação ambiental e favorecimento à produtividade, com associação das árvores lenhosas, culturas e/ou pecuária (Upson et al., 2016; Dhyaní et al., 2016; Kay et al., 2017; Kuyah et al., 2019; Suárez et al., 2021).

A diminuição do  $P_0$  no solo visto no sistema de pastagem se deve às consequências do uso de práticas não conservacionistas que degradam o solo, compactando-o, impactando na destruição e desagregação dos agregados, na redução do teor de matéria orgânica (Ramos et al., 2019) e aumento da erosão do solo, refletindo em redução dos teores de nutrientes, incluindo o  $P_0$ . Conseqüentemente, estas práticas se mostram prejudiciais ao desenvolvimento de culturas (Paes et al., 2021).

Apesar dessa melhora e de, em níveis medianos, os teores de  $P_0$  serem maiores em Floresta Plantada comparados a mata e pastagem é pertinente ressaltar que Floresta Plantada são uma forma de manejar os solos, mas não é excludente o acompanhamento da área de plantio avaliando periodicamente a necessidade de complementar a adubação. Alfaia et al. (2004) mostraram a eficiência do SAF em melhorar as qualidades do solo. Entretanto, a exportação de nutrientes pela cultura pode limitar a produção de frutos ao longo do tempo.

Metanálises anteriores apontavam para um efeito geral positivo de manejo agroflorestal em prestação de serviços ecossistêmicos, quando comparados com cultivos convencionais do solo e pastagem (Nair, 2007; Torralba et al. 2016). Da mesma forma, esta meta-análise confirma a premissa básica da ciência agroflorestal, na qual a complexibilidade do sistema implica na vinculação de ciclos de nutrientes.

É importante ressaltar que futuros trabalhos abordando o comparativo direto entre os usos da terra e os diferentes tipos arbóreos implementados irão aprimorar e esclarecer mais dúvidas sobre o melhor manejo do solo com a finalidade de preservação do meio, associado a altas produtividades agrícolas na junção de árvores, culturas e produção animal, garantindo o máximo aproveitamento dos solos e recursos naturais.

#### Classes e Textura do Solo

O P no solo é dependente de fatores que vão além do uso da terra. O material de origem, grau de evolução pedogenética dos solos e teor de argila (Viana, 2017) são questões que compõem as características encontradas no solo capazes de influenciar nos teores de  $P_o$ . Solos mais jovens tendem a ser mais ricos em nutrientes quando comparados a solos mais intemperizados. Este fato é observado na regressão com Latossolos, apresentando os teores mais reduzidos e, em contrapartida, nos Nitossolos, os teores mais elevados.

Walker e Adams (1959) e Gatiboni et al. (2013) encontraram um predomínio de  $P_o$  em solos mais jovens. Essa tendência pode ser atribuída aos processos de formação do solo ao longo do tempo. Solos mais jovens, como os Nitossolos, podem ser mais ricos em nutrientes devido à sua formação recente e à presença de material orgânico fresco, que contribuem para a disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas. Por outro lado, solos mais intemperizados, como os Latossolos, passaram por processos de intemperismo e lixiviação ao longo do tempo, o que pode resultar na remoção de nutrientes solúveis e na formação de solos menos férteis.

Os solos estudados mostraram que textura argilosa apresenta medianas de teores de  $P_o$  superiores às demais, conforme esperado, suportando a hipótese testada. Estudos mostram que o P do solo está diretamente relacionado com os teores de argila (Rinaldi et al., 2019; Aleixo et al., 2020). Uma comparação entre os solos mais argilosos com os mais arenosos mostra que as argilas possuem mais sítios de

ligação com o P (Hansen et al., 2002), acarretando seus maiores teores. Deng et al. (2017) observaram uma diminuição significativa de P nos solos de textura média e arenosa.

A fixação de P no solo se correlaciona com os teores de argila, pois esses são fixadores de P, podendo aumentar essa fixação quando ricas em oxihidróxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Novais e Smyth, 1999). Chen et al. (2008), em uma revisão, concluíram que a reciclagem da serrapilheira de agroflorestas sustenta os teores de P. Por esta razão é muito importante aumentar a proporção de material orgânico em solos com altos teores de argila, pois elas favorecem a disponibilidade de P através do bloqueio dos sítios de adsorção nas superfícies das argilas (Moreira e Siqueira, 2006).

Desta forma, os sistemas de Florestas Plantadas, como as agroflorestas de cacau, com alto aporte de resíduos favorece as relações entre solo e planta, aumentando o material orgânico no solo podendo ser mineralizado e possibilitando a disponibilização de P para ser reabsorvido favorecendo a sustentabilidade do sistema.

## CONCLUSÃO

A meta-análise mostrou que a implantação de sistemas de florestas plantadas resulta em um aumento significativo nos teores de  $P_o$  nos solos brasileiros, quando comparados com mata e pastagem. Isso é atribuído ao maior aporte de material vegetal nas florestas plantadas, possibilitando, principalmente em solos tropicais, com condições úmidas desse clima, favorecem a transferência de fósforo do material vegetal para o solo, contribuindo para o ciclo biogeoquímico de nutrientes e a deposição de fósforo no solo.

A análise da textura e classes de solo revelou que solos mais jovens, como os Nitossolos, tendem a apresentar teores mais elevados de  $P_o$  devido à presença de material orgânico fresco. Além disso, solos com textura mais argilosa demonstraram ter teores mais elevados de  $P_o$ , devido à sua capacidade de fixação de fósforo. Assim, é de suma importância a gestão sustentável dos recursos naturais e do planejamento adequado do uso da terra para promover a fertilidade do solo e a sustentabilidade dos sistemas de florestas plantadas.

Este trabalho viabilizou um abrangente conhecimento do comportamento do  $P_o$  nos solos brasileiros com padrões sustentáveis de produção por meio do uso de sistemas de Florestas Plantadas quando comparado a outros usos da terra. Desta

forma, manejos que visem a sustentabilidade do sistema como uma produção orgânica proporciona um maior teor de  $P_0$  nos solos servindo de fonte deste nutriente para as plantas e, conseqüentemente, atuando como um serviço ecossistêmico e reduzindo custos de produção futuros para o produtor bem como a redução do uso de fontes químicas de P que, como já mencionado, são reservas finitas, possibilitando uma crescente produtividade e restauração do ecossistema a longo prazo.

## RECONHECIMENTOS E FINANCIAMENTO

Grato aos professores desta instituição pelo apoio ilimitado prestado durante o decorrer deste trabalho. O estudo foi realizado durante o período de Doutorado no departamento de produção vegetal da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aleixo, S., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Campello, E.F.C., Silva, E.C., Schripsema, J., (2020). Can soil phosphorus availability in tropical forest systems be increased by nitrogen-fixing leguminous trees? *Science of the Total Environment*, 712, 136405.
- Alfaia, S.S.; Ribeiro, G.A.; Nobre, A.D.; Luizão, R.C.; Luizão, J. (2004). Evaluation of soil fertility in smallholder agroforestry systems and pastures in western Amazonia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 102:409-414
- Baveye, P. C., Baveye, J., and Gowdy, J. (2016). Soil “Ecosystem” Services and Natural Capital: Critical Appraisal of Research on Uncertain Ground. *Front. Environ. Sci.* 4, 41.
- Buckwell, A. Nadeu, E. (2016). Nutrient Recovery and Reuse (NRR) in European agriculture. A review of the issues, opportunities, and actions. RISE Foundation, Brussels.
- Bumaguin, D. B. (2016). Utilização da diferença de médias padronizadas como medida de efeito. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Estatística) – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. Instituto de Matemática e Estatística. Porto Alegre.
- Bunemann E.K. (2015). Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus – A review *Soil Biology and Biochemistry*, 89, pp. 82-98.

- Chen, C.R., Condon, L.M., Davis, M.R., Sherlock, R.R. (2000). Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil. *Journal Article*. Vol. 220, pp. 151-163.
- Cherubin MR, Karlen DL, Cerri CEP, Franco ALC, Tormena CA, Davies CA, Cerri CC. (2016). Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLoS One*.11: e0150860.
- Cherubin MR, Karlen DL, Franco ALC, Cerri CEP, Tormena CA, Cerri CCA. A (2016) Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. *Soil Sci Soc Am J*. 80:215-26.
- Cogo, F. D. (2020). *Introdução à revisão sistemática e meta-análise aplicadas à agricultura*. Editora UEMG.
- Cohen J. (1988). *Statistical Power analysis for the behavioral sciences*. 2<sup>nd</sup> ed. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Darch, T., Blackwell, M.S.A., Hawkins, J.M.B., Haygarth, P.M., Chadwick, D., (2014). A meta-analysis of organic and inorganic phosphorus in organic fertilizers, soils, and water: implications for water quality. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology* 44, 2172–2202.
- Deng, Q., McMahon, D. E., Xiang, Y., Yu, C., Jackson, R. B., Hui, D. (2017). A global meta-analysis of soil phosphorus dynamics after afforestation. *New Phytologist*. Volume 213, Issue 1. 181-192.
- EMBRAPA (2021) *Serviços Ecosistêmicos*. (2021). Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-servicos-ambientais/perguntas-e-respostas>>. Acesso em: 20 de jun. de 2021.
- Gatiboni, L.C.; Brunetto, G.; Rheinheimer, D.S.; Kaminski, J. (2013) *Fracionamento Químico das Formas de Fósforo do Solo: Usos e Limitações*. In: ARAÚJO, A.P. & ALVES, B.J.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. V.8. p.141-187.
- Guido, S., James, R. C.,k Gerta R. (2015). *Meta-Analysis with R*. Springer. DOI 10.1007/978-3-319-21416-0
- Guo, Z., Wan, S., Hua, K., Yin, Y., Chu, H.Y., Wang, D., Guo, X. (2020). Fertilization regime has a greater effect on soil microbial community structure than crop rotation and growth stage in an agroecosystem. *Applied Soil Ecology* Volume 149, 103510.
- Haag, H. P. *Ciclagem de nutrientes em florestas tropicais*. Campinas: Fundação Cargill, 1 985. I 14p.
- Hansen, N.C., Daniel, T.C., Sharpley, A.N., Lemunyon, J.L. (2002). The fate and transport of phosphorus in agricultural systems *J. Soil Water Conserv.*, 57, pp. 408-417

- Higgins, J. P. T. (2003). Measuring inconsistency in meta-analyses. *BMJ*, 327(7414), 557–560.
- Hou, E., Chen, C., Luo, Y., Zhou, G., Kuang, Y., Zhang, Y., Heenan, M., Lu, X., Wen, D. (2018). Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems. *Glob. Change Biol.* 24, 3344–3356.
- Kay, S., Rega, C., Moreno, G., den Herder, M., Palma, J. H. N., Borek, R., Crous-Duran, J., Freese, D., Giannitsopoulos, M., Graves, A., Jäger, M., Lamersdorf, N., Memedemin, D., Mosquera-Losada, R., Pantera, A., Paracchini, M. L., Paris, P., Roces-Díaz, J. V., Rolo, V., Rosati, A., Sandor, M., Smith, J., Szerencsits, E., Varga, A., Viaud, V., Wawer, R., Burgess, P.J., Herzog, F. (2019). Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy*, 83(), 581–593.
- Kuyah, S., Whitney, C. W., Jonsson, M., Sileshi, G. W., Öborn, I., Muthuri, C. W.; Luedeling, E. (2019). Agroforestry delivers a win-win solution for ecosystem services in sub-Saharan Africa. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(5), 47.
- Lilienfein, J.; Wilcke, W.; Lima, S.C.; Vivel, L.; Thomas, R. & Zech, W. (2000) Nutrient concentrations in soil solution of some Brazilian Oxisols under conventional and no-tillage systems in the early part of rainy season. *Aust. J. Soil Res.*, 38:851-866.
- Liu J, Hu Y, Yang J, Abdi D, Cade-Menun BJ. (2015). Investigation of soil legacy phosphorus transformation in long-term agricultural fields using sequential fractionation, P K-edge XANES and solution P NMR spectroscopy. *Environ. Sci. Technol.* 49:168–176.
- MacDonald, G. K.; Bennett, E. M.; Potter, P. A.; Ramankutty, N. (2011). Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(7), 3086–3091.
- Mafongoya, P.L., Sileshi, G.W. (2020). Chapter 3 – Indices to identify and quantify ecosystem services in sustainable food systems. Academic Press, pp. 43-71.
- Moreira, F.M.S.; Siqueira, J.O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. Lavras: Ed. UFLA, 2006. 626 p.
- Muchane, M. N.; Sileshi, G. W.; Gripenberg, S.; Jonsson, M.; Pumarino, L.; Barrios, E. (2020). Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295 – 106899.
- Nair, P. K. R. (2007). The coming of age of agroforestry. 87(9), 1613–1619.
- Novais, R.F. & Smyth, T.J. & Nunes, F.N. Fósforo. (2007). In: Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B. & Neves, J.C.L. *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. P.471-537.
- Novais, R.F. & Smyth, T.J. (1999). *Fósforo em solos e planta em condições tropicais*. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa. 399p.

- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P. Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *International Journal of Surgery*. Volume 88, 105906.
- Pearson, K. (1904) *On the Theory of Contingency and Its Relation to Association and Normal Correlation*. Biometric Series, Drapers' Co. Memoirs, London.
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Acessado in: <<https://www.R-project.org>> Acesso em: 20 de jun. de 2022.
- Rey Benayas JM, Newton AC, Diaz A, Bullock JM. (2009). Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis. *Science* 325:1121–4.
- Rinaldi, L.C.B., Aleixo, S., Silva, E.C., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Gonçalves, J.L.M., Rocha, J.H.T., Schripsema, J., (2021). 31P NMR Spectroscopy and structural models of soil organic phosphorus under Eucalyptus. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* volume 120, pages83–97.
- Rodrigues, M., Pavinato, P.S., Withers, P. J. A., Teles, A. P., Herrera, W. F. B. (2016). Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savana. *Science of the Total Environment*. 0048-969.
- Rutgers, M., van Wijnen, H.J., Schouten, A.J., Mulder, C., Kuiten, A.M.P., Brussaard, L. (2012). A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. *Science of the Total Environment* 415, 39-48.
- Sanchez, P.A. *Properties and management of soils in the tropics*. John Wiley and Sons. New York. 1976, 409p.
- Santos, D.R. dos; Gatiboni, L.C.; Kaminski, J. (2008). Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586.
- Suárez, J. C., Casanoves, F., Bieng, M. A. N, Melgarejo, L. M., Di Rienzo, J. A., Armas, C. (2021). Prediction model for sap flow in cacao trees under different radiation intensities in the western Colombian Amazon. *Scientific Reports*, 11:10512.
- Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P. J., Moreno, G., Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 150–161.
- Upton, M.A., Burgess, P.J., Morison, J.I.L. (2016). Soil carbon changes after establishing woodland and agroforestry trees in a grazed pasture. *Geoderma*, 283, 10–20.



- Viana, T.O., Gama-Rodrigues, A., 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, Tarciana de Oliveira (2016) Frações de fósforo sob diferentes usos e classes de solo na Região Sul da Bahia. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes. F. 88.
- Vitousek, P.M., Porder, S., Houlton, B.Z., Chadwick, O.A., (2010). Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecol. Appl.* 20, 5–15.
- Walker, T.W. & Adams, A.F.R. (1959). Studies on soil organic matter: 3. Influence of increased leaching at various stages of weathering on levels of carbon, nitrogen, sulfur, organic and inorganic phosphorus. *Soil Sci.*, 87:1-10.

## Material Suplementar

S1. Número de pontos de dados em diferentes regiões do Brasil tabulados para metanálise sobre fósforo orgânico do solo.

Sistemas	Nº Trabalhos	Nº Pontos tabelados
<b>Floresta Plantada</b>	10	58
<b>Mata</b>	10	30
<b>Pastagem</b>	9	22

S2. Estatística Descritiva dos trabalhos selecionados contendo os teores de P<sub>o</sub> em Floresta Plantada (Tratamento) e Mata (Controle).

Autor ano	Floresta Plantada			Mata		
	<i>n</i>	Média	Desvio-Padrão	<i>n</i>	Média	Desvio-Padrão
Viana et al. 2018	7	368.97	130.03	2	221.5	19.94
Viana 2017	7	350.16	120.26	2	209.06	2.17
Rodrigues et al. 2016	4	125.62	44.69	4	44.85	22.82

Obs. Valores médios dado em mg/kg. Planilha usada para confecção dos gráficos *Forest Plot*.

S3. Estatística Descritiva dos trabalhos selecionados contendo os teores de P<sub>o</sub> em Floresta Plantada (Tratamento) e Pastagem (Controle).

Autor ano	Floresta Plantada			Pastagem		
	<i>n</i>	Média	Desvio-Padrão	<i>n</i>	Média	Desvio-Padrão
Viana et al. 2018	7	368.97	130.03	2	231.25	5.87
Viana 2017	7	350.16	120.26	2	205.71	20.22
Lilienfein et al. 2000	3	125.65	3.88	2	105.65	7.99

Obs. Valores médios dado em mg/kg. Planilha usada para confecção dos gráficos *Forest Plot*.

S4. Estatística Descritiva dos trabalhos selecionados contendo os teores de P<sub>o</sub> em Mata (Tratamento) e Pastagem (Controle).

Autor ano	Mata			Pastagem		
	<i>n</i>	Média	D.-Padrão	<i>n</i>	Média	D.-Padrão
Soltangheisi et al. 2019	2	115.65	24.82	2	111.5	7.49
Viana et al. 2018	2	221.5	19.94	2	231.25	5.87
Viana 2017	2	209.06	2.17	2	205.71	20.22
Cherubin et al. 2016	3	161.4	86.67	3	123.16	30.42

Obs. Valores médios dado em mg/kg. Planilha usada para confecção dos gráficos *Forest Plot*.

#### 4. RESUMO E CONCLUSÕES

A preocupação com a disponibilidade do fósforo no solo aumenta com o passar dos anos, principalmente em solos como os encontrados no Brasil devido sua alta capacidade de adsorção do P, tornando indisponível o nutriente como fonte no solo. Somando sua indisponibilidade à chamada crise do P, leva-se em consideração a redução dos fertilizantes em virtude da limitação de sua matéria-prima propiciando o aumento da fome generalizada. Assim, a necessidade de entender o ciclo do fósforo, em especial a fração orgânica, se torna urgente a fim de solucionar os desafios na compreensão e caracterização dos grandes reservatórios de fósforo orgânico que existem no solo como serviço ambiental propiciando uma redução no uso de adubos químicos e conseqüentemente a elevada saturação do elemento adsorvido ao solo além da busca por possíveis métodos de conservação de P tanto na agricultura como na economia.

Entender essas interações entre fatores edáficos, climáticos e o Po do solo são importantes para escolher a melhor forma de manejar os solos driblando as interações que favoreçam a imobilização de P e facilitando e/ou propiciando meios dos microrganismos atuarem na mineralização de Po funcionando como fonte de P para o aumento e manutenção da produtividade agrícola.

Com esta revisão sistemática e metanalítica foi possível observar que os sistemas de Florestas Plantadas podem assumir um papel importante na manutenção e disponibilidade do Po do solo se aproximando de usos da terra com *inputs* de adubos químicos como os sistemas convencionais, que as classes de solo com alto grau de intemperismo apresentam altos teores de Po e, que o método de extração de Po

proposto por Bowman e Moir (1993) se mostrou eficiente em extrair o Po em solos brasileiros com teores próximos ao método de Hedley. Ainda foi possível ver a influência dos fatores climáticos sobre a dinâmica do Po nos solos brasileiros por meio das correlações entre eles, portanto, mais estudos sobre a dinâmica de Po e a influência de fatores edáficos e climáticos devem ser considerados visto que estamos enfrentando rápida mudanças climáticas em todo o mundo e os efeitos negativos à fertilidade do solo que essas mudanças podem causar ainda não pouco conhecidos.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdi D, Cade-Menun BJ, Ziadi N, Parent LÉ. (2014) *Long-term impact of tillage practices and phosphorus fertilization on soil phosphorus forms as determined by  $p$  nuclear magnetic resonance spectroscopy*. J Environ Qual. 43(4):1431-41.
- Ahmad, M., Ahmad, M., El-Naggar, A. H., Usman, A. R. A., Abduljabbar, A., Vithanage, M., ... Al-Wabel, M. I. (2017). *Aging effect of organic and inorganic fertilizers on phosphorus fractionation in a calcareous sandy loam soil*. Pedosphere. Volume 28, Issue 6, Pages 873-883.
- Aleixo, S. (2018) *Especiação e transformações do fósforo orgânico em solos florestais e agroflorestais na região da mata atlântica no Brasil*. Tese (Doutorado), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ. p. 105.
- Aleixo, S., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Campello, E.F.C., Silva, E.C., Schripsema, J., (2020). Can soil phosphorus availability in tropical forest systems be increased by nitrogen-fixing leguminous trees? Science of the
- Aleixo, S.; Gama-Rodrigues, A. C.; Costa, M. G.; Sales, M. V. S.; Gama-Rodrigues, E. F.; Marques, J. R. B. (2016) *P transformations in cacao agroforests soils in the Atlantic forest region of Bahia, Brazil*. Agroforest Syst. DOI 10.1007/s10457-016-9939-6.
- 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*. Volume 17, e00220.
- 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.  
<https://doi.org/10.1007/s10457-016-9939-371> 6

- Alfaia, S.S.; Ribeiro, G.A.; Nobre, A.D.; Luizão, R.C.; Luizão, J. (2004). Evaluation of soil fertility in smallholder agroforestry systems and pastures in western Amazonia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 102:409-414
- Alvarez V., V. H., Ribeiro, A. C. (1999). *Calagem*. In A. C. Ribeiro, P. T. G. Guimarães, V. H. Alvarez V. (Eds.), *Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais* (5 ed., pp. 43-60).
- Baveye, P. C., Baveye, J., and Gowdy, J. (2016). Soil “Ecosystem” Services and Natural Capital: Critical Appraisal of Research on Uncertain Ground. *Front. Environ. Sci.* 4, 41.
- Bhattacharya, A. (2019). *Changing Environmental Condition and Phosphorus-Use Efficiency in Plants*. *Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants*, 241–305.
- Bowman, R. A. (1989) *A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and dilute base for soil organic phosphorus*. *Soil Science Society of America Journal*, 53(2), 362-366.
- Bowman, R. A., Cole, C. V. (1978) *Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NAHCO<sub>3</sub> extraction*. *Soil Science*, 125(1), 49-54.
- Bowman, R. A., Moir, J. O. (1993) *Basic EDTA as an extractant for soil organic phosphorus*. *Soil Science Society of America Journal*, 57(6), 1516-1518.
- Buckwell, A. Nadeu, E. (2016). *Nutrient Recovery and Reuse (NRR) in European agriculture. A review of the issues, opportunities, and actions*. RISE Foundation, Brussels.
- Bumaguin, D. B. (2016). *Utilização da diferença de médias padronizadas como medida de efeito*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Estatística) – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. Instituto de Matemática e Estatística. Porto Alegre.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., ... Brussaard, L. (2018). *Soil quality – A critical review*. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125.
- Bünemann, E.K. (2015) *Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus e A review*. *Soil Biology & Biochemistry*. 89:82-98.
- Cade-Menun, B. J. (2005) *Characterizing phosphorus in environmental and agricultural samples by <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance spectroscopy*. Geological and Environmental Sciences Department, Building 320, Room 118, Stanford University, Stanford, CA 94305-2115, USA.

- Cade-Menun, B.J.; Elkin, K.R.; Liu, C.W.; Bryant, R.B.; Kleinman, P.J.A.; Moore, P.A.Jr. (2018) *Characterizing the phosphorus forms extracted from soil by the Mehlich III soil test*. *Geochem Trans.* 19:7
- Cella, D.; Rossi, M.C.L. (2010) *Análise do mercado de fertilizantes no Brasil*. *Interface Tecnológica - v.7 - n.1.*
- Chen, C.R., Condon, L.M., Davis, M.R., Sherlock, R.R. (2000). Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil. *Journal Article*. Vol. 220, pp. 151-163.
- Cherubin MR, Karlen DL, Franco ALC, Cerri CEP, Tormena CA, Cerri CCA. A (2016) Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. *Soil Sci Soc Am J.* 80:215-26.
- Cogo, F. D. (2020). *Introdução à revisão sistemática e meta-análise aplicadas à agricultura*. Editora UEMG.
- Cohen J. (1988). *Statistical Power analysis for the behavioral sciences*. 2<sup>nd</sup> ed. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Condon L.M., Newman S. (2011) *Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils*. *Soils Sediments* 11:830–840.
- Costa MG, Gama-Rodrigues AC, Gonçalves JLDM, Gama-Rodrigues EF, Sales MVDS, Aleixo S (2016) *Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil*. *Forests* 7(1):15
- Cunha, M.G.; Gama–Rodrigues, A.C.; Costa, G.S.; Velloso, A.C.X. 2007. Organic phosphorus in soils under montane forests; pastures and eucalyptus in Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 31:667–672 (in Portuguese, with abstract in English). <http://doi.org/10.1590/S0100–06832007000400007>
- Darch, T.; Blackwell, M.S.A.; Hawkins, J. M.B.; Haygarth, P. M.; Chadwick, D. (2014) *A meta-analysis of organic and inorganic phosphorus in organic fertilizers, soils and water; implications for water quality*. Taylor & Francis. DOI: 10.1080/10643389.2013.790752.
- Deng, Q.; McMahon, D.E.; Xiang, Y.; Yu, C.; Jackson, R.B.; Hui, D. (2017) *A global meta-analysis of soil phosphorus dynamics after afforestation*. *New Phytologist* 213: 181–192 1
- Dick, W.A., Tabatabai, M.A. (1977) *Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds*. *Journal of Environmental Quality*, 6, 82-85.

- Duda, G. P.; Guerra, J. G. M.; Pereira, M. G.; Anjos, L. H. C.; Ribeiro, M. R. (2013) *Avaliação da biodisponibilidade de fósforo em diferentes classes de solos do Brasil*. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 34, n. 4, p. 1563-1576.
- EMBRAPA (2021) Serviços Ecológicos. (2021). Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-servicos-ambientais/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 20 de jun. de 2021.
- Embrapa. (1999). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes* (E. solos Ed.). Brasília - DF, Brasil: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
- Eriksson, A.K.; Hillier, S.; Hesterberg, D.; Klysubun, W.; Ulén, B.; Gustafsson, J.P. (2016). *Evolution of phosphorus speciation with depth in an agricultural soil profile*. Geoderma. 280:29–37.
- Feng, W.; Li, C.; Zhang, C.; Liu, S.; Song, F.; Guo, W.; He, Z.; Li, T.; Chen, H. (2018) *Characterization of phosphorus in algae from a eutrophic lake by solution <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance spectroscopy*. Limnology. Volume 20, Issue 2, pp 163–171.
- Ferreira, E. B.; Cavalcanti, P. P.; Nogueira, D. A. *ExpDes: Experimental designs package*. R package version 1.1.2. 2013. Available at: <<http://cran.r-project.org/web/packages/ExpDes/index.html>>. Access:14 Fev. 2019.
- Figueiredo Filho, D. B.; Paranhos, R.; Silva Júnior, J.A.; Rocha, E.C.; Alves, D.P. (2014) *O que é, para que serve e como se faz uma meta-análise?* Teoria e Pesquisa, v. 23, n. 2, p. 205–228.
- Fox, T. R., Miller, B. W., Rubilar, R., Stape, J. L., & Albaugh, T. J. (2011). Phosphorus Nutrition of Forest Plantations: The Role of Inorganic and Organic Phosphorus. *Phosphorus in Action*, 317–338.
- Freiling, M., Tucher, S., Schmidhalter, U. (2022) Factors influencing phosphorus placement and effects on yield and yield parameters: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*. 2016:105257
- Frossard E, Condron LM, Oberson A, Sinaj S, Fardeau JC (2000) Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *Journal of Environmental Quality*, 29:15-23.
- Fundação Heinrich Böll. (2018) *Atlas do Agronegócio: fatos e números sobre as corporações que controlam o que comemos*. Casarão Ameno Resedá - Catete, Rio de Janeiro-RJ. p. 1-58.
- Gama-Rodrigues, A. C.; Aleixo, S.; Schripsema, J.; Gama-Rodrigues, E. F. Can leguminous trees increase soil phosphorus availability? A link between the P and N cycles in tropical



forests and agroforests of Brazil. In: 21st World Congress of Soil Science, 2018, Rio de Janeiro. 21st World Congress of Soil Science, 2018.

- 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. <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9946-x>
- Gao, X.-L., Li, X. G., Zhao, L., & Kuzyakov, Y. (2019). *Regulation of soil phosphorus cycling in grasslands by shrubs*. *Soil Biology and Biochemistry*. doi:10.1016/j.soilbio.2019.02.012.
- Gatiboni, L. C., Brunetto, G., Rheinheimer, D. S., Kaminski, J., Pandolfo, C. M., Veiga, M, Flores, A. F. C., Lima, M. A. Silveira., Giroto, E., Copetti, A. C. C.. (2013). *Spectroscopic quantification of soil phosphorus forms by 31p-nmr after nine years of organic or mineral fertilization*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(3), 640-648.
- Gatiboni, L.C.; Brunetto, G.; Rheinheimer, D.S.; Kaminski, J. (2013) Fracionamento Químico das Formas de Fósforo do Solo: Usos e Limitações. In: ARAÚJO, A.P. & ALVES, B.J.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. V.8. p.141-187.
- George, TS., Giles, CD., Menezes-Blackburn, D., Condon, LM., Gama-Rodrigues, AC., Jaisi, D., ... Haygarth, PM. (2017). *Organic phosphorus in the terrestrial environment: A perspective on the state of the art and future priorities*. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3391-x>
- Gérard F (2016) Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils—A myth revisited. *Geoderma* 262:213–226.
- Godinho, T. O.; Caldeira, M. V. W.; Brun, E. J. (2015) *Ciclagem de nutrientes via serapilheira em ecossistemas florestais naturais no Brasil*. *Ciências Florestais e Biológicas*, p. 13-52.
- Grant, C.A.; Flaten, D.N.; Tomasiewicz, D.J.; Sheppard, S.C. (2011) A Importância do Fósforo no Desenvolvimento Inicial da Planta. *Informações Agrônomicas* Nº 95.
- Guerra, J.G.M.; Almeida, D.J.; Santos, G.A.; Fernandes, M.S. 1996. Organic phosphorus content in soil samples. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 31:291–299 (in Portuguese, with abstract in English). <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-3921.pab1996.v31.4484>

- Guido, S., James, R. C., Gerta R. (2015). *Meta-Analysis with R*. Springer. DOI 10.1007/978-3-319-21416-0
- Guo, Z., Wan, S., Hua, K., Yin, Y., Chu, H.Y., Wang, D., Guo, X. (2020). Fertilization regime has a greater effect on soil microbial community structure than crop rotation and growth stage in an agroecosystem. *Applied Soil Ecology* Volume 149, 103510.
- Haag, H. P. *Ciclagem de nutrientes em florestas tropicais*. Campinas: Fundação Cargill, 1 985. I 14p.
- Hansen, N.C., Daniel, T.C., Sharpley, A.N., Lemunyon, J.L. (2002). The fate and transport of phosphorus in agricultural systems *J. Soil Water Conserv.*, 57, pp. 408-417
- Haygarth, P.; Harrison A. F.; Turner, B. L. (2018) On the history and future of soil organic phosphorus research: a critique across three generations: On soil organic phosphorus. *European Journal of Soil Science*. 69(1) DOI: 10.1111/ejss.12517.
- Hedley M.J, Stewart J.W.B, Chauhan B.S (1982) *Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations*. *Soil Sci Soc Am J* 46:970–976
- Higgins, J. P T (2003). Measuring inconsistency in meta-analyses. *BMJ*, 327(7414), 557–560.
- Hooda, P. S., Truesdale, V. W., Edwards, A. C., Withers, P. J. A., Aitken, M. N., Miller, A., & Rendell, A. R. (2001). *Manuring and fertilization effects on phosphorus accumulation in soils and potential environmental implications*. *Advances in Environmental Research*, 5(1), 13–21.
- Hou, E., Chen, C., Luo, Y., Zhou, G., Kuang, Y., Zhang, Y., Heenan, M., Lu, X., Wen, D. (2018). Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*. 24:3344-3356.
- Jin Liu, J.; Hu, Y.; Yang, J.; Abdi, D.; Cade-Menun, B.J. (2015) *Investigation of Soil Legacy Phosphorus Transformation in LongTerm Agricultural Fields Using Sequential Fractionation, P K-edge XANES and Solution P NMR Spectroscopy*. *Environ. Sci. Technol.* 49, 168–176
- Kay, S., Rega, C., Moreno, G., den Herder, M., Palma, J. H. N., Borek, Ro., Crous-Duran, J., Freese, D., Giannitsopoulos, M., Graves, A., Jäger, M., Lamersdorf, N., Memedemin, D., Mosquera-Losada, R., Pantera, A., Paracchini, M. L., Paris, P.; Roces-Díaz, J. V.; Rolo, V.; Rosati, A.; Sandor, M.; Smith, J.; Szerencsits, E.; Varga, A.; Viaud, V.; Wawer, R.; Burgess, P.J.; Herzog, F. (2019). Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy*, 83(), 581–593.
- Kuyah, S., Whitney, C. W., Jonsson, M., Sileshi, G. W., Öborn, I., Muthuri, C. W.; Luedeling, E. (2019). Agroforestry delivers a win-win solution for ecosystem

- services in sub-Saharan Africa. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(5), 47.
- Lang, F., Bauhus, J., Frossard, E., George, E., Kaiser, K., Kaupenjohann, M., Krüger, J., Matzner, E., Polle, A., Prietzel, J., (2016). *Phosphorus in forest ecosystems: new insights from an ecosystem nutrition perspective*. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 179 (2), 129–135.
- Lilienfein, J.; Wilcke, W.; Lima, S.C.; Viveló, L.; Thomas, R. & Zech, W. (2000) Nutrient concentrations in soil solution of some Brazilian Oxisols under conventional and no-tillage systems in the early part of rainy season. *Aust. J. Soil Res.*, 38:851-866.
- Liu J, Hu Y, Yang J, Abdi D, Cade-Menun BJ. (2015). Investigation of soil legacy phosphorus transformation in long-term agricultural fields using sequential fractionation, P K-edge XANES and solution P NMR spectroscopy. *Environ. Sci. Technol.* 49:168–176.
- Mabagala, S.F., Mng'ong'o, M.E. (2022) On the tropical soils; The influence of organic matter (OM) on phosphate bioavailability. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 29: 3635-3641.
- MacDonald, G. K.; Bennett, E. M.; Potter, P. A.; Ramankutty, N. (2011). Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(7), 3086–3091.
- Mafongoya, P.L., Sileshi, G.W. (2020). Chapter 3 – Indices to identify and quantify ecosystem services in sustainable food systems. Academic Press, pp. 43-71.
- Menezes-Blackburn, D., Giles, C., Darch, T. et al. (2018) *Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review*. *Plant Soil*. 427: 5.
- Milića, S.; Ninkova, J.; Zeremskia, T.; Latković, D.; Šeremešić, S.; Radovanović, V.; Žarković, B. (2019) *Soil fertility and phosphorus fractions in a calcareous chernozem after a long-term field experimente*. *Geoderma*. Volume 339, Pages 9-19.
- Moreira, F.M.S.; Siqueira, J.O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. Lavras: Ed. UFLA, 2006. 626 p.
- Muchane, M. N.; Sileshi, G. W.; Gripenberg, S.; Jonsson, M.; Pumarino, L.; Barrios, E. (2020). Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295 – 106899.
- Murphy, J., Riley, J. P. (1962) *A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters*. *Analytical Chemistry Acta*, 27, 31-36.
- Nair, P. K. R. (2007). The coming of age of agroforestry. 87(9), 1613–1619.
- Nasha, D.M.; Haygarth, P.M.; Turner, B.L.; Condon, L.M.; DowelleAlan, R.W.; Richardson, A.E; Watkins, M.; Heaven, M.W. (2014) *Using organic phosphorus*

*to sustain pasture productivity: A perspective*. Geoderma. Volumes 221–222, Pages 11-19.

Novais, R.F. & Smyth, T.J. & Nunes, F.N. Fósforo. (2007). In: Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B. & Neves, J.C.L. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. P.471-537.

Novais, R.F. & Smyth, T.J. (1999). Fósforo em solos e planta em condições tropicais. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa. 399p.

Oliveira, R. I., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Zaia, F. C., Pereira, M. G., Fontana, A. (2014) *Organic phosphorus in diagnostic surface horizons of different Brazilian soil orders*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 38(5), 1411-1420.

Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, FAO. (2017) *World fertilizer trends and outlook to 2020*. Roma. 1-38.

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P. Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. International Journal of Surgery. Volume 88, 105906.

Parfitt, R. L.; Baisden, W. T.; Elliott, A. H. (2008) *Phosphorus inputs and outputs for New Zealand in 2001 at national and regional scales*, Journal of the Royal Society of New Zealand, 38:1, 37-50.

Pearson, K. (1904) On the Theory of Contingency and Its Relation to Association and Normal Correlation. Biometric Series, Drapers' Co. Memoirs, London.

Pereira, H. S. (2009) Fósforo e potássio exigem manejos diferenciados. visão agrícola. nº9, 43-46 jul/dez.

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Acessado in: <<https://www.R-project.org>> Acesso em: 20 de jun. de 2022.

R Development Core Team (2009) *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Viena. <http://www.R-project.org>.

Rey Benayas JM, Newton AC, Diaz A, Bullock JM. (2009). Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis. Science 325:1121–4.

- Richardson, A.E.; George, T.S.; Hens, M.; Simpson, R.J. (2005) Utilisation of soil organic phosphorus by higher plants. In 'Organic phosphorus in the environment'. (Eds BL Turner, E Frossard, DS Baldwin) pp. 165–184. (CABI: Wallingford, UK)
- Rinaldi, L.C.B. (2018). *Especiação de fósforo em solos com diferentes texturas e cultivados com eucalipto*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 107p.
- Rinaldi, L.C.B., Aleixo, S., Silva, E.C., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Gonçalves, J.L.M., Rocha, J.H.T., Schripsema, J., (2021). 31P NMR Spectroscopy and structural models of soil organic phosphorus under Eucalyptus. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* volume 120, pages83–97.
- Rita, J.C.O.; Gama–Rodrigues, A.C.; Gama–Rodrigues, E.F.; Zaia, F.C.; Nunes, D.A.D. 2013. Mineralization of organic phosphorus in soil size fractions under different vegetation covers in the north of Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37:1207–1215. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000500010>
- Rodrigues, M., Pavinato, P.S., Withers, P. J. A., Teles, A. P., Herrera, W. F. B. (2016). Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savana. *Science of the Total Environment*. 0048-969.
- Rutgers, M., van Wijnen, H.J., Schouten, A.J., Mulder, C., Kuiten, A.M.P., Brussaard, L. (2012). A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. *Science of the Total Environment* 415, 39-48.
- Sanchez, P.A. Properties and management of soils in the tropics. John Wiley and Sons. New York. 1976, 409p.
- Santos, D. R.; Gatiboni, L. C.; Kaminski, J. (2008) *Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto*. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, Mar/Abr.
- SIGMAPLOT. 2008. *For windows, version 11.0*. Systat Software, 2008.
- Spohn, M. (2020). Phosphorus and carbon in soil particle size fractions: A synthesis. *Biogeochemistry*. <https://doi.org/10.1007/s10533-019-00633-x>
- Suárez, J. C., Casanoves, F., Bieng, M. A. N, Melgarejo, L. M., Di Rienzo, J. A., Armas, C. (2021). Prediction model for sap flow in cacao trees under different radiation intensities in the western Colombian Amazon. *Scientific Reports*, 11:10512.
- Tian, K., Xing, Z., Kalkhajeh, Y.K., Zhao, T., Hu, W., Huang, B., Zhao, Y. (2022) Excessive phosphorus inputs dominate soil legacy phosphorus accumulation and

its potential loss under intensive greenhouse vegetable production system. *Journal of Environmental Management*. 303:114-149.

Tiessen H, Cuevas E, Chacon P (1994) The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* 371:783.

Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P. J., Moreno, G., Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 150–161.

Turner, B. L., Cade-Menun, B. J., Condronc, L. M., Newmand, S. (2005) *Extraction of soil organic phosphorus*. *Talanta* 66. 294–306.

Turner, B. L.; Condron, L.M.; Richardson,S.J.; Peltzer, D.A.; Allison, V.J. (2007) *Soil Organic Phosphorus Transformations During Pedogenesis*. *Ecosystems* (2007) 10: 1166–1181.

Turner, B.L., Frossard, E., Baldwin, D.S. (2003) Organic phosphorus in the environment. Ascona, Swizerland: *Organic Phosphorus*, p.391.

Upson, M.A., Burgess, P.J., Morison, J.I.L. (2016). Soil carbon changes after establishing woodland and agroforestry trees in a grazed pasture. *Geoderma*, 283, 10–20.

Vance, C.P., Uhde-Stone, C., Allan, D.L., (2003). *Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource*. *New Phytol.* 157 (3), 423–447.

Viana, T.O., Gama-Rodrigues, A., 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, Tarciana de Oliveira (2016) Frações de fósforo sob diferentes usos e classes de solo na Região Sul da Bahia. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes. F. 88.

Vitousek, P.M., Porder, S., Houlton, B.Z., Chadwick, O.A., (2010). Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecol. Appl.* 20, 5–15.

Walker, T. W. and Syers, J. K.: The fate of phosphorus during pedogenesis, *Geoderma*, 15, 1–19, 1976.

Walker, T.W. & Adams, A.F.R. (1959). Studies on soil organic matter: 3. Influence of increased leaching at various stages of weathering on levels of carbon, nitrogen, sulfur, organic and inorganic phosphorus. *Soil Sci.*, 87:1-10.

- Wei, K.; Chen, Z.; Zhang, X.; Chen, L. (2019) *Phosphorus forms and their distribution under long-term no tillage systems*. Plant, Soil and Environment, 65, (1): 35–40.
- Weihrauch, C.; Opp, C. (2018) *Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far*. Geoderma. Volume 325, Pages 183-194.
- Yang X, Post WM (2011) Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: a synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. Biogeosciences. 8:2907–2916
- Zaia, F.C.; Gama–Rodrigues, A.C.; Gama–Rodrigues, E.F.; Machado, R.C.R. 2008. Organic phosphorus in soils under cocoa agroecosystems. Revista Brasileira de Ciência do Solo 32:1987–1995 (in Portuguese, with abstract in English). <http://doi.org/10.1590/S0100–49206832008000500020>
- Zaia, F.C.; Gama–Rodrigues, A.C.; Gama–Rodrigues, E.F.; Moço, M.K.S.; Fontes, A.G.; Machado, R.C.R.; Baligar, V.C. 2012. Carbon; nitrogen; organic phosphorus; microbial biomass and N mineralization in soils under cacao agroforestry systems in Bahia; Brazil. Agroforestry Systems 86(2):197–212. <http://doi.org/10.1007/s10457–012–9550–4>.