

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO**

TESE

**Variabilidade Espacial das Formas de Fósforo em
Solo sob Manejo Conservacionista no Sistema
Integrado de Produção Agroecológica,
Seropédica - RJ**

Anderson de Souza Gallo

2020



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA –
CIÊNCIA DO SOLO**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DAS FORMAS DE FÓSFORO EM SOLO
SOB MANEJO CONSERVACIONISTA NO SISTEMA INTEGRADO DE
PRODUÇÃO AGROECOLÓGICA, SEROPÉDICA - RJ**

ANDERSON DE SOUZA GALLO

Sob a Orientação do Professor
Eduardo Lima

e Coorientação do Professor
Marcos Gervasio Pereira

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2020

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G172v	<p>Gallo, Anderson de Souza, 1985- Variabilidade espacial das formas de fósforo em solo sob manejo conservacionista no sistema integrado de produção agroecológica, Seropédica - RJ. / Anderson de Souza Gallo. – Seropédica, 2020. 149 f.: il.</p> <p>Orientador: Eduardo Lima. Tese (Doutorado). – – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, 2020.</p> <p>1. Bibliometria. 2. Extração sequencial. 3. Fósforo orgânico. 4. Legado de fósforo. 5. Manejo sustentável. I. Lima, Eduardo, 1955-, orient. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo III. Título.</p>
-------	---

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA CIÊNCIA DO SOLO

ANDERSON DE SOUZA GALLO

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo, Área de Concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas.

TESE APROVADA EM 27/02/2020.

Eduardo Lima. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Marcos Bacis Ceddia. Dr. UFRRJ

Juliano Bahiense Stafanato. Dr. UFRRJ

Ednaldo da Silva Araújo. Dr. Embrapa Agrobiologia

José de Souza Oliveira Filho. Dr. UECE

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Tennyson e Maria Edileusa,
À minha namorada e amiga, Nathalia,*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

À minha família, pela confiança e por estar sempre ao meu lado, me apoiando de maneira incondicional.

Ao meu orientador, Doutor Eduardo Lima e meu co-orientador, Doutor Marcos Gervasio Pereira, pela transmissão de conhecimento, esforço, atenção e compreensão nos momentos que precisei durante a formação.

À minha namorada e melhor amiga, Nathalia de França Guimarães, pelo carinho, paciência e companheirismo.

Aos professores Everaldo Zonta, José Guilherme Marinho Guerra e Marcos Bacis Ceddia, pela disponibilidade e ajuda indispensáveis.

Ao Doutor José de Souza Oliveira Filho, pela disponibilidade e ajuda em todos os momentos que precisei.

Aos funcionários e estagiários do Labfer em especial aos técnicos Anselmo Boechat, Jair Guedes e Luís Otávio, pela ajuda com as análises laboratoriais.

Ao meu amigo, Mestre Luiz Alberto da Silva Rodrigues Pinto, pela essencial ajuda com o fracionamento de fósforo.

Ao doutorando Thiago Sampaio, por disponibilizar as informações de manejo do módulo experimental de cultivo orgânico de hortaliças.

À Doutora Livia Bischof Pian, por estar sempre disponível para ajudar.

À Fazendinha Agroecológica Km 47, por abrir as portas para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e ao Programa de pós-graduação em Agronomia – Ciência do Solo, pela oportunidade de formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que de alguma forma ajudaram na realização deste trabalho, por menor que tenha sido a contribuição.

RESUMO GERAL

GALLO, Anderson de Souza. **Variabilidade espacial das formas de fósforo em solo sob manejo conservacionista no sistema integrado de produção agroecológica, Seropédica - RJ.** 2020. 149f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

O fósforo (P) está entre os elementos mais importantes para o vigor e desenvolvimento das plantas. Contudo, possui forte tendência de reagir com componentes do solo, tornando-se indisponível às plantas. Diversos fatores podem afetar a dinâmica e distribuição espacial do P no solo, inclusive, o sistema de manejo adotado. Sistemas conservacionistas, com aporte frequente de matéria orgânica, podem favorecer os teores da fração orgânica do P, que após a mineralização, constitui uma fonte de P para as plantas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial das formas orgânicas e inorgânicas de P em solo sob manejo conservacionista. Além disso, visando avaliar a relevância do P orgânico nos solos agrícolas, foi realizado um estudo da estrutura e evolução da produção científica sobre P orgânico do solo a nível global, utilizando abordagem bibliométrica. Para avaliar a estrutura e evolução da produção científica sobre P orgânico (capítulo I) foram realizadas buscas por trabalhos indexados na base Web of Science, no período de 1998-2018. Para avaliar a variabilidade espacial das formas de fósforo em solo sob manejo conservacionista (capítulo II), estudou-se uma área constituída de um módulo experimental de produção orgânica de hortaliças, com fertilização exclusivamente a base de fontes vegetais. Foram coletadas amostras de solo em 72 pontos da área, com grade de pontos a cada 10 metros. As amostragens ocorreram em cinco profundidades: 0-0,05 m; 0,05-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, totalizando 360 amostras. Foram extraídas as frações lábil, moderadamente lábil e moderadamente resistente das formas inorgânicas e orgânicas de P, além da fração P residual e P total (soma de todas as frações). Além disso, foram determinados alguns atributos químicos e físicos do solo, a fim de verificar a influência destes na distribuição das formas de P na área. No estudo bibliométrico, o número de publicações e citações aumentou linearmente em função dos anos, com o maior número de publicações em 2015 (73 artigos) e de citações em 2018 (2754 citações). No período considerado, foram encontrados 80 países publicando estudos sobre P orgânico do solo. Entre eles, os EUA foi o mais produtivo, com 207 artigos (21,85% do total), seguido por China (13,41%, N = 127) e Austrália (11,93 %, N = 113). Conclui-se que o P orgânico do solo representa um tema científico relevante, que deve ser considerado por governos e países em suas políticas científicas e tecnológicas. No estudo da variabilidade espacial, os resultados indicam que o manejo adotado, aliado às características inerentes ao solo da área, influencia a variabilidade espacial das frações orgânicas e inorgânicas de P, principalmente as menos estáveis (lábil e moderadamente lábil). A forma inorgânica teve maior participação no P total do solo, exceto na profundidade 0,20-0,40 m, em que o P orgânico foi mais expressivo. A distribuição espacial das formas de P na área evidencia que a adubação fosfatada deve ser realizada considerando zonas de manejo, evitando que áreas com pouca necessidade de P recebam as mesmas quantidades que as com deficiência. As informações contidas no presente estudo podem ser usadas para otimizar as aplicações de fertilizantes contendo P, aumentando a produtividade das culturas, reduzindo os custos e os possíveis problemas ambientais advindos de práticas inadequadas de fertilização.

Palavras-chave: Bibliometria. Extração sequencial. Fósforo orgânico. Legado de fósforo. Manejo sustentável.

GENERAL ABSTRACT

GALLO, Anderson de Souza. **Spatial variability of forms of phosphorus in a soil under conservation management in the integrated agroecological production system, Seropédica - RJ.** 2020. 149p. Thesis (Doctorate in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

Phosphorus (P) is among the most important elements for the vigor and development of plants. However, it has a strong tendency to react with soil components, making it unavailable to plants. Several factors can affect the dynamics and spatial distribution of P in the soil, including the management system adopted. Conservation systems, with frequent supply of organic matter, can favor the contents of the organic fraction of P, which after mineralization, constitutes a source of P for plants. The aim of the present study was to evaluate the spatial variability of organic and inorganic forms of P in soil under conservation management. In addition, in order to assess the relevance of organic P in agricultural soils, a study of the structure and evolution of scientific production on organic soil P was carried out globally, using a bibliometric approach. In order to assess the structure and evolution of scientific production on organic P (chapter I) searches were carried out for works indexed in the Web of Science database, in the period 1998-2018. To assess the spatial variability of phosphorus forms in soil under conservation management (chapter II), an area consisting of an experimental module for organic vegetable production was studied, with fertilization exclusively based on plant sources. Soil samples were collected at 72 points in the area, with a grid of points every 10 meters. Sampling took place at five depths: 0-0.05 m; 0.05-0.10 m; 0.10-0.20 m; 0.20-0.40 m and 0.40-0.60 m, totaling 360 samples. The labile, moderately labile and moderately resistant fractions were extracted from the inorganic and organic forms of P, in addition to the residual P and total P fractions (sum of all fractions). In addition, some chemical and physical attributes of the soil were determined in order to verify their influence on the distribution of P forms in the area. In the bibliometric study, the number of publications and citations increased linearly over the years, with the largest number of publications in 2015 (73 articles) and citations in 2018 (2754 citations). In the period considered, 80 countries were found publishing studies on soil organic P. Among them, the USA was the most productive, with 207 articles (21.85% of the total), followed by China (13.41%, N = 127) and Australia (11.93%, N = 113). It is concluded that the organic P of the soil represents a relevant scientific theme, which should be considered by governments and countries in their scientific and technological policies. In the study of spatial variability, the results indicate that the management adopted, combined with the characteristics inherent to the soil of the area, influences the spatial variability of the organic and inorganic fractions of P, especially the least stable (labile and moderately labile). The inorganic form had a greater participation in the total P of the soil, except in the depth of 0.20-0.40 m, in which the organic P was more expressive. The spatial distribution of P forms in the area shows that phosphate fertilization must be carried out considering management areas, avoiding that areas with little need for P receive the same amounts as those with deficiency. The information contained in this study can be used to optimize the applications of fertilizers containing P, increasing the productivity of crops, reducing costs and possible environmental problems arising from inadequate fertilization practices.

Keywords: Bibliometry. Sequential extraction. Organic phosphorus. Phosphorus legacy. Sustainable management.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolução temporal da publicação de artigos científicos sobre fósforo orgânico do solo no período de 1998 a 2018 a nível mundial.	33
Figura 2. Evolução temporal do número de citações de artigos sobre fósforo orgânico do solo no período de 1998 a 2018 a nível mundial.	34
Figura 3. Mapa de palavras-chave mais utilizadas em artigos sobre fósforo orgânico do solo, no período 1998-2018. Cores diferentes representam os termos pertencentes a diferentes clusters. O tamanho do termo é baseado no número de ocorrências. As linhas de conexão indicam os 100 links de co-ocorrência mais fortes entre os termos.	41
Figura 4. Mapa de co-autoria dos trabalhos publicados sobre fósforo orgânico do solo, no período 1998-2018. Foram selecionados autores com mínimo de 20 artigos listados na base de dados <i>Web of Science</i> . As linhas de conexão indicam os 200 links de co-ocorrência mais fortes entre os termos.	42
Figura 5. Mapa de localização da área de estudo com destaque para o grid amostral. Seropédica-RJ, 2019.	80
Figura 6. Vista aérea do módulo de cultivo orgânico de hortaliças, com destaque para os subsistemas. Polígono amarelo: subsistema tomate/telado; polígono preto: subsistema policultivo e polígono vermelho: Gliricídia/capineira. Fonte: Google Earth, 2020.	81
Figura 7. Semivariogramas dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,0-0,05 m.).	99
Figura 8. Semivariogramas dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,05-0,10 m.).	101
Figura 9. Semivariogramas dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,10-0,20 m.).	102
Figura 10. Semivariogramas dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,20-0,40 m.).	104
Figura 11. Semivariogramas dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,40-0,60 m.).	105
Figura 12. Semivariogramas das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,0-0,05 m.).	107
Figura 13. Semivariogramas das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,05-0,10 m.).	108
Figura 14. Semivariogramas das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,10-0,20 m.).	109
Figura 15. Semivariogramas das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,20-0,40 m.).	112
Figura 16. Semivariogramas das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,40-0,60 m.).	113
Figura 17. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,0-0,05 m. Seropédica, RJ, 2019.	116

Figura 18. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,05-0,10 m. Seropédica, RJ, 2019.	118
Figura 19. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,10-0,20 m. Seropédica, RJ, 2019.	121
Figura 20. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,20-0,40 m. Seropédica, RJ, 2019.	122
Figura 21. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,40-0,60 m. Seropédica, RJ, 2019.	124
Figura 22. Mapas da variabilidade espacial das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,0-0,05 m. Seropédica, RJ, 2019.....	127
Figura 23. Mapas da variabilidade espacial das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,05-0,10 m. Seropédica, RJ, 2019.....	130
Figura 24. Mapas da variabilidade espacial das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,10-0,20 m. Seropédica, RJ, 2019.....	131
Figura 25. Mapas da variabilidade espacial das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,20-0,40 m. Seropédica, RJ, 2019.....	133
Figura 26. Mapas da variabilidade espacial das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,40-0,60 m. Seropédica, RJ, 2019.....	134

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Número de artigos científicos sobre fósforo orgânico do solo recuperados no <i>Web of Science</i> por país, no período de 1998 a 2018.	35
Tabela 2. Vinte instituições mais produtivas em termo de publicações sobre fósforo orgânico do solo durante o período de 1998 a 2018.	36
Tabela 3. Vinte pesquisadores mais produtivos em termo de publicações sobre fósforo orgânico do solo durante o período de 1998 a 2018.	36
Tabela 4. Quinze principais periódicos científicos onde estão publicados os artigos sobre fósforo orgânico do solo no período de 1998 a 2018.	38
Tabela 5. Quinze artigos científicos mais citados sobre fósforo orgânico do solo no período de 1998 a 2018.	39
Tabela 6. Cultivos presentes no Módulo de Cultivo Orgânico Intensivo de Hortaliças. Seropédica-RJ, 2019.	78
Tabela 7. Características químicas do solo no módulo experimental de cultivo orgânico de hortaliças em cada subsistema e nas profundidades de amostragem 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. Seropédica – RJ, 2019.	82
Tabela 8. Estatística descritiva de atributos químicos e físicos do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Seropédica, RJ, 2019.	89
Tabela 9. Estatística descritiva de atributos químicos e físicos do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. Seropédica, RJ, 2019.	92
Tabela 10. Estatística descritiva das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Seropédica, RJ, 2019.	94
Tabela 11. Estatística descritiva das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. Seropédica, RJ, 2019.	96
Tabela 12. Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados dos atributos químicos e físicos do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Seropédica, RJ, 2019.	97
Tabela 13. Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados dos atributos químicos e físicos do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Seropédica, RJ, 2019.	103
Tabela 14. Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Seropédica, RJ, 2019.	106
Tabela 15. Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. Seropédica, RJ, 2019.	111

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Fertilidade em Solos Agrícolas.....	4
2.2 Importância do Fósforo.....	5
2.3 Absorção de P Pelas Plantas	6
2.4 Aplicação de P em Áreas Agrícolas	7
2.5 Fertilizantes Fosfatados e Longevidade das Reservas de Fosfato	8
2.6 Estratégias Para Sustentabilidade do P em Solos Agrícolas.....	12
2.7 Formas e Dinâmica do Fósforo no Solo	12
2.8 Fosforo Orgânico e Sua Importância na Nutrição de Plantas.....	14
2.9 Fósforo em Solos Sob Sistemas Conservacionistas de Manejo.....	19
2.10 Fracionamento do Fósforo	21
2.11 Uso da Geoestatística na Análise Espacial do Fósforo.....	23
3. CAPÍTULO I ESTRUTURA E EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA SOBRE FÓSFORO ORGÂNICO DO SOLO: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	27
3.1 RESUMO.....	28
3.2 ABSTRACT.....	29
3.3 INTRODUÇÃO	30
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	32
3.4.1 Obtenção dos dados	32
3.4.2 Tratamento dos dados e avaliações	32
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
3.5.1 Evolução temporal da publicação de artigos.....	33
3.5.2 Evolução temporal do número de citações.....	34
3.5.3 Número de artigos científicos por país.....	34
3.5.4 Instituições mais produtivas	35
3.5.5 Pesquisadores mais produtivos	36
3.5.6 Principais periódicos científicos	37
3.5.7 Artigos mais citados.....	38
3.5.8 Mapa de cluster de palavras-chave	40
3.5.9 Mapa de cluster de co-autoria	42
3.6 CONCLUSÕES	43
3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
4 CAPÍTULO II VARIABILIDADE ESPACIAL DAS FORMAS DE FÓSFORO EM SOLO SOB MANEJO CONSERVACIONISTA	73
4.1 RESUMO.....	74
4.2 ABSTRACT.....	75
4.3 INTRODUÇÃO	76

4.4 MATERIAL E MÉTODOS	78
4.4.1 Descrição da área de estudo	78
4.4.2 Amostragem do Solo	80
4.4.3 Avaliações	83
4.4.4 Análise dos dados	85
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
4.5.1 Análise descritiva dos dados	87
4.5.2 Análise dos parâmetros dos semivariogramas dos atributos avaliados	97
4.5.3 Mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo	114
4.6 CONCLUSÕES	137
4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
5 CONCLUSÕES GERAIS	149

1 INTRODUÇÃO GERAL

O fósforo (P) é o décimo primeiro elemento mais abundante na crosta terrestre (JOHNSTON; STEEN, 2000). Ocorre na natureza como fosfato, nas rochas fosfáticas, como as apatitas (PANTANO et al., 2016). É usado pela sociedade principalmente em fertilizantes (cerca de 80% do uso global de rocha fosfática) (VAN VUUREN et al., 2010). Porém, especialmente em regiões de clima tropical, com solos intemperizados, a baixa disponibilidade de P no solo limita o crescimento e desenvolvimento das plantas devido a fortes interações do P com os compostos do solo, por exemplo, adsorção e precipitação com Fe e Al (TELES et al., 2017). Desta forma, há fraca recuperação de P de fertilizantes, o que resulta em um acúmulo líquido de P no solo (RICHARDSON et al., 2009). Atualmente, cerca de 80% do P obtido a partir de recursos não renováveis não é reaproveitado (CHOJNACKA et al., 2019), se espalhando no ambiente enquanto seus depósitos não renováveis se tornam escassos (SVANBÄCK et al., 2019).

A dinâmica do P é decisiva em relação à produção vegetal, e esta tende a ser comprometida quando ocorre déficit desse nutriente no sistema, sendo necessária a adoção de fertilizantes em larga escala (ALEIXO et al., 2017). Desta forma, preocupações em torno da longevidade e localização das reservas de fosfato mineral levantam o debate sobre a sustentabilidade do P a longo prazo (CORDELL et al., 2009), uma vez que se trata de um recurso finito e insubstituível (DANESHGAR et al., 2018). Estima-se que em meados de 2050 a demanda mundial de P duplique (CORDELL; WHITE, 2011), esgotando as reservas mundiais de rochas fosfáticas nos próximos 50-100 anos (CORDELL et al., 2009), o que representa um sério risco à segurança alimentar das populações (CHOJNACKA et al., 2019).

Para o manejo sustentável do P nos solos, é necessário aprimorar as práticas de aplicação dos fertilizantes (PANTANO et al., 2016), que é realizada sem considerar a variabilidade espacial dentro de uma área de manejo, aumentando o custo do processo produtivo, uma vez que áreas com pouca necessidade de P recebem as mesmas quantidades que as com deficiência (MARQUES JÚNIOR et al., 2008). O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo é necessário para uma gestão mais precisa dos nutrientes do solo em locais específicos (DELBARI et al., 2019) e pode ser determinante para melhor administração no diagnóstico de áreas com deficiência de P e para adoção quantitativa da adubação (LEÃO et al., 2007).

A disponibilidade e mobilidade do P nos solos dependem de suas formas químicas (YANG et al., 2013). O P é dividido em dois grandes grupos, P inorgânico (Pi) e P orgânico (Po) (SANTOS et al., 2008a), que diferem em seu comportamento e destino nos solos (TURNER et al., 2007). Pi compreende o íon fosfato na solução do solo, todas as formas ligadas com ferro (Fe), alumínio (Al) e Cálcio (Ca) e adsorvidas aos oxi-hidróxidos de Fe e de Al da fração argila e, ainda, as formas estruturais dos minerais fosfatados (GATIBONI et al., 2013). Po representa o P constituinte de compostos orgânicos, isto é, que contêm ligações carbono-hidrogênio (TURNER et al., 2005). É originário principalmente de processos biológicos que envolvem a assimilação de ortofosfato e subsequente liberação à medida que os resíduos vegetais e animais adicionados ao solo e materiais microbianos amadurecem e se decompõem (CONDRON et al., 2005; MARTINAZZO et al., 2007). Pode constituir de 5 a 80% do P total do solo, e, nos solos tropicais, é fonte de P às plantas (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2003).

Em solos com baixos teores de P disponível, o Po torna-se relevante para o sistema (GATIBONI et al., 2007; LIU et al., 2015). Em geral, formas orgânicas de P têm menor afinidade com a fase sólida do solo em comparação com formas inorgânicas, assim, sendo

mais móveis no solo e menos suscetíveis às reações de adsorção (CARNEIRO et al., 2011). Sua dinâmica está estreitamente associada à dinâmica da matéria orgânica do solo (CUNHA et al., 2007; LIU et al., 2016; WILLY et al., 2019). Assim, cultivos conservacionistas, devido a menor perturbação do solo e maior entrada de resíduos orgânicos, levam a um alto teor de matéria orgânica no solo e podem reduzir efetivamente a necessidade de fornecimento externo de P (EICHLER-LÖBERMANN et al., 2007; TIECHER et al., 2012; YANG et al., 2019; ALEWELL et al., 2020). Estes sistemas afetam potencialmente uma série de propriedades do solo, incluindo a atividade microbiana e a estrutura da comunidade microbiana (STOCKDALE et al., 2001), que está cada vez mais reconhecida como o principal condutor da dinâmica do P no solo (RICHARDSON; SIMPSON, 2011; HALLAMA et al., 2018), e, conseqüentemente, na disponibilização de P nos agroecossistemas (WEI et al., 2018; DAI et al., 2020).

A biomassa microbiana desempenha um papel importante no ciclo do P e nas transformações do Po via excreção de enzimas e mineralização de P na matéria orgânica do solo (ACHAT et al., 2010). Também regulam a disponibilidade de P pela solubilização do P mineral através da secreção de ácidos orgânicos e inorgânicos (ZHU et al., 2018). Além disso, através da imobilização em seus tecidos, podem evitar a adsorção de P nos colóides inorgânicos do solo (RHEINHEIMER et al., 2019). Ainda, adições de matéria orgânica podem reduzir a fixação de P aumentando a competição do ânion orgânico por sítios de ligação de P (PALM et al., 2014), resultando em aumento de sua disponibilidade (BARBIERI et al., 2013; MARGENOT et al., 2017).

Diversos estudos já demonstraram que sistemas conservacionistas podem melhorar a gestão de P (DAMON et al., 2014; FAGERIA et al., 2016; ANDRADE et al., 2017; VARELA et al., 2017; PROCHNOW et al., 2018; PANDAY et al., 2019), principalmente devido a maior presença de matéria orgânica, e conseqüentemente de Po (NELSON; JANKE, 2007; NEGASSA et al., 2019; NIEDERBERGER et al., 2019), uma vez que a mineralização das frações orgânicas do P causa uma liberação de Pi na solução do solo (ACHAT et al., 2010).

Estas características aumentaram o interesse científico em acessar Po presente no solo para a produção de plantas (SPOHN et al., 2013), diminuindo assim a dependência de fertilizantes inorgânicos e aumentando a relevância do Po do solo, e reduzindo a curto e médio prazo a necessidade de adições continuadas de P (HAYGARTH et al., 2013), o que resultou em um aumento da cooperação internacional sobre o tema (MENEZES-BLACKBURN et al., 2018), elevando o número de publicações sobre Po nas últimas duas décadas (GEORGE et al., 2018). Portanto, Po vem ganhando cada vez mais importância em estudos envolvendo a dinâmica e biodisponibilidade de P nos solos (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2003; HUANG et al., 2017; HAYGARTH et al., 2018).

A capacidade de utilizar Po para sustentar a produtividade agrônômica com o declínio dos insumos convencionais conduz à pesquisa das interações entre o Po, uso e manejo da terra (NASH et al., 2014). Portanto, compreender as relações e interações das variadas formas de P nos solos e os numerosos fatores que influenciam sua disponibilidade, bem como sua variabilidade espacial, é essencial para o manejo eficiente de P (HAVLIN et al., 2005; LEÃO et al., 2007).

A hipótese deste trabalho é que o histórico de uso do solo, sob manejo conservacionista, com fertilização exclusivamente a base de fontes vegetais, influencia na distribuição espacial das formas de P do solo, com ênfase na fração orgânica deste elemento.

O estudo tem como objetivo avaliar a variabilidade espacial das formas de P em solo sob manejo conservacionista, num sistema integrado de produção agroecológica, com fertilização exclusivamente a base de fontes vegetais. Além disso, visando avaliar a relevância

do Po nos solos agrícolas, foi realizado um estudo da estrutura e evolução da produção científica sobre Po do solo a nível global, utilizando abordagem bibliométrica.

Os objetivos específicos do estudo foram:

Capítulo I: Estrutura e evolução da produção científica sobre fósforo orgânico do solo: uma análise bibliométrica.

- a. Avaliar a evolução e a contribuição dos países para pesquisa científica sobre fósforo orgânico do solo;
- b. Identificar os pesquisadores, grupos de pesquisa e instituições mais relevantes, bem com sua cooperação para o avanço do tema;
- c. Apresentar um panorama das pesquisas realizadas ao longo do tempo e contribuir com novos estudos sobre o tema em questão.

Capítulo II: Variabilidade espacial das formas de fósforo em solo sob manejo conservacionista.

- a. Avaliar a dinâmica do fósforo em área de produção orgânica, com manejo de fertilização exclusivamente à base de fontes vegetais;
- b. Verificar se ocorre acúmulo das frações de P em formas orgânicas em função do sistema de manejo adotado;
- c. Quantificar as frações de P no perfil do solo em diferentes profundidades de amostragem;
- d. Fracionar o fósforo em diferentes graus de labilidade;
- e. Mapear a distribuição das frações de fósforo no solo.
- f. Avaliar a relação entre a distribuição das frações de P e atributos físicos e químicos do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Fertilidade em Solos Agrícolas

Analisando-se historicamente o processo de evolução tecnológica na agricultura, verifica-se que essa sempre foi objeto das observações atentas de todos os que procuravam melhorar as práticas correntes (ASSIS, 2006). A agricultura passa por um processo contínuo de modernização, via incorporação de novas tecnologias, gerando por um lado o crescimento econômico e, por outro, riscos potenciais ao meio ambiente (ROSSET et al., 2014; VENTURA et al., 2018). Este cenário se dá, principalmente, pelo fato de que atualmente, os sistemas agrícolas estão voltados para a produção convencional com alta dependência de agrotóxicos, fertilizantes sintéticos e cultivares selecionados para elevada produtividade em sistemas de monocultivo (ROY et al., 2007; BURNEY et al., 2010; ROSSET et al., 2014; GUIMARÃES et al., 2015). Como consequência da expansão agrícola desordenada, uma série de impactos ecossistêmicos pode ser verificada ao longo dos anos. A perda da diversidade biológica, a redução dos recursos florestais, o comprometimento da qualidade dos recursos hídricos e do sistema solo estão entre os mais aparentes (ZHANG et al., 2007; POWER, 2010; SCHOLZ et al., 2014; GALLO et al., 2016).

Do ponto de vista relacionado ao solo, essas mudanças produzem impactos importantes na fertilidade do solo, exaurindo suas reservas orgânicas e minerais, transformando solos com grande potencial de produção em solos de baixa fertilidade (LUIZÃO et al., 2009; DUARTE et al., 2014). Os solos agrícolas brasileiros são naturalmente ácidos e de baixa fertilidade (BLANK et al., 2006; SOUZA et al., 2009; VENDRAME et al., 2010) e necessitam de manejo adequado (CORREA et al., 2008) e planejamento da sua fertilidade. Assim, a adubação balanceada se torna necessária (FAGERIA, 1998) para fornecer ao solo os nutrientes essenciais ao desenvolvimento dos vegetais, função esta atribuída aos adubos ou fertilizantes (DIAS et al., 2012). Segundo White e Brown (2010), é importante otimizar a eficiência com que os fertilizantes são usados na produção agrícola. Contudo, o que se observa é um insatisfatório balanço de nutrientes na agricultura brasileira (FAO, 2004).

Diversos fatores influenciam a disponibilidade dos nutrientes no solo, entre os principais fatores, pode-se destacar: tipo de material de origem do solo e estágio de intemperismo, teores de argila e matéria orgânica no solo, interações positivas e negativas entre os nutrientes, reações de oxirredução, espécie cultivada, intensidade do uso do solo, exsudatos orgânicos de raízes e subprodutos de microrganismos e o pH do solo (JAKOBSEN, 1992; SALCEDO, 2006; SANTOS et al., 2009; SOUZA et al., 2010; DIAS et al., 2012; MARAGON et al., 2013; ARAUJO et al., 2014; PADILHA et al., 2014; MELO et al., 2016; RENÉ et al., 2017; BÜCHI et al., 2018; GARCÍA-GONZALEZ et al., 2018). Solos com boa fertilidade são aqueles capazes de suprir à cultura implantada nutrientes essenciais nas quantidades e proporções adequadas para o seu crescimento e desenvolvimento durante seu ciclo, visando a obtenção de ganhos produtivos e permitindo identificar os principais fatores que limitam tal capacidade, bem como a capacidade de diagnose das condições do solo, possibilitando, assim, uma tomada de decisão para a sua correção ou manutenção (BISSANI et al., 2008; GROTH et al., 2013).

O solo é responsável por armazenar e fornecer água, além disso, possui função de fornecer os elementos minerais exigidos pelas plantas, sendo estes vitais aos vegetais, que absorvem os elementos minerais em quantidades específicas necessárias ao seu desenvolvimento, sendo a quantidade o critério que define os nutrientes em macronutrientes e micronutrientes (DIAS et al., 2012). Estes elementos minerais são adquiridos da solução do solo pelas raízes das plantas. Eles atravessam a raiz através de vias apoplásticas (extracelulares) e/ou simplásticas (intracelulares) para a estela, onde são carregadas no xilema

para transporte até a parte aérea. Os atributos químicos nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) são chamados de macronutrientes primários (POGRZEBA et al., 2018), por serem requeridos em grandes quantidades, assim como os macronutrientes secundários: cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) (DIAS et al., 2012), enquanto, boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mb), níquel (Ni) e zinco (Zn) são os chamados micronutrientes, geralmente, retirados do solo (ANDA, 2007; WHITE; BROWN, 2010; DIAS et al., 2012).

Os macronutrientes primários são frequentemente componentes principais de fertilizantes que são introduzidos no solo em diferentes formas químicas (POGRZEBA et al., 2018). Ambos os grupos de macronutrientes desempenham um papel significativo no metabolismo de plantas (proteína, DNA, RNA, pigmentos fotossintéticos vegetais, cofatores enzimáticos associados ao transporte de metabólitos) e também na proteção contra diferentes estressores abióticos (TRIPATHI et al., 2014; POGRZEBA et al., 2018). Dentre os macronutrientes, o P merece grande destaque, pois, de acordo com Rajj (1991), no Brasil esse nutriente é utilizado nas adubações em quantidades maiores que as de nitrogênio (N) e potássio (K). Este fato relaciona-se à sua baixa dinâmica nos solos, aliada à sua forte tendência de ser fixado e de reagir com outros componentes como o Fe, o Al e o Ca, dentre outros, formando compostos de baixa solubilidade (LIMA et al., 2007). Além disso, não há elementos que possam substituir as funções vitais do P nos organismos vivos, tampouco o seu papel no cenário da segurança alimentar (PANTANO et al., 2016).

2.2 Importância do Fósforo

O fósforo (P) é o décimo primeiro elemento mais abundante na crosta terrestre (JOHNSTON; STEEN, 2000). É um ametal que pertence ao grupo do nitrogênio e ocorre na natureza normalmente como fosfato, nas chamadas rochas fosfáticas, como as apatitas (PANTANO et al., 2016). É um nutriente essencial à manutenção da vida de todos os organismos (TIESSEN et al., 2011). É usado pela sociedade principalmente em fertilizantes, detergentes, alimentos para animais e outros produtos químicos (VAN VUUREN et al., 2010). A primeira categoria é dominante em termos de volume (cerca de 80% do uso global de rocha fosfática), mas também em termos de sua importância para a sociedade humana (VAN VUUREN et al., 2010). Do ponto de vista agrônômico, está entre os elementos mais importantes para o vigor e desenvolvimento das plantas (CECATO et al., 2007).

Este nutriente é, talvez, o mais investigado na literatura, em função de sua importância para os seres vivos, da frequência com que limita a produção das culturas, sobretudo nas regiões tropicais e pelo fato de ser um insumo mineral finito e insubstituível (MALAVOLTA, 2006). Pode ser considerado um dos mais limitantes a produção agrícola brasileira, estando frequentemente em baixas concentrações nos solos brasileiros, principalmente em função do material de origem e de sua adsorção nas argilas, tornando-se indisponível às plantas (FERREIRA et al., 2014). Assim, a dinâmica desse elemento assume um caráter decisivo em relação à produção vegetal, e esta tende a ser comprometida quando ocorre déficit desse nutriente no sistema, sendo necessária a adoção de fertilizantes em larga escala (ALEIXO et al., 2017).

O P tem função essencial para vários organismos vivos, como plantas e animais (PANTANO et al., 2016). É extremamente necessário para todos os principais processos de desenvolvimento e reprodução em plantas (LÓPEZ-ARREDONDO et al., 2014). Desempenha um papel importante na fotossíntese, na respiração, no metabolismo de açúcares, na divisão celular, no alargamento das células e na transferência da informação genética (MALAVOLTA, 1996; HAMMOND; WHITE, 2008; OBERSTEINER et al., 2013). Do ponto de vista molecular, nas estruturas dos ácidos desoxi (DNA) e ribonucleicos (RNA), o P

forma a ligação de fosfodiéster entre um nucleotídeo e outro. É constituinte do ATP (Adenosina Trifosfato), um nucleotídeo formado por uma adenosina associada a três radicais fosfatos conectados em cadeia, responsáveis pelo transporte primário de energia química nas células. Também pode ser encontrado em membranas celulares na forma de fosfolipídios (PANTANO et al., 2016). Ele é constituinte de importantes compostos das células vegetais, incluindo fosfato presente nas moléculas de açúcares intermediários da respiração e fotossíntese (SOUZA et al., 2006). Têm grande importância no crescimento do sistema radicular, ampliando a área de exploração das raízes no solo (BAHL; PASRICHA, 1998). Seu suprimento adequado promove o uso mais eficiente da água e, conseqüentemente, dos outros nutrientes (GUIMARÃES et al., 2011), além de aumentar a resistência da planta às doenças e aos problemas causados por temperaturas muito baixas (GRANT et al., 2001). É ainda componente de muitas proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos e substratos metabólicos (DECHEN; NACHTIGALL, 2007).

Portanto, as plantas são profundamente afetadas pela deficiência de P (KAVANOVÁ et al., 2006). Os sintomas de deficiência de P incluem retardo de crescimento, formação de folhas pequenas e encaracoladas, ocorrência de número reduzido de flores e perfilhos, promoção maciça do desenvolvimento radicular lateral e piloso, coloração verde escuro a roxo nas folhas, devido ao aumento da síntese de antocianina, baixa qualidade de sementes e decréscimo na produtividade das culturas (RAGHOTHAMA, 1999; DOBERMANN; FAIRHURST, 2000; HYLAND et al., 2005; VIÉGAS et al., 2011). Segundo Malavolta (1980), a rápida redistribuição de P dos órgãos mais velhos para os mais novos, quando ocorre carência do elemento, faz com que as folhas mais velhas sejam as primeiras a mostrarem os sintomas, ou seja, a carência desse elemento no substrato induz a planta a utilizar o P não metabolizado, localizado no vacúolo das folhas mais velhas, sendo redistribuído para os órgãos mais novos, cujo crescimento cessa quando acaba tal reserva.

Conseqüentemente, mesmo a deficiência marginal de P tem um grande impacto no crescimento e desenvolvimento das plantas (CARSTENSEN et al., 2018) podendo prejudicar gravemente o rendimento das culturas e o desenvolvimento de frutos/sementes (ASHLEY et al., 2011). Portanto, as plantas requerem P em quantidades adequadas para cumprir um ciclo de vida completo (FRYDENVANG et al., 2015). Por esta razão, os efeitos da deficiência de P no rendimento das culturas tornaram-se uma preocupação mundial nos últimos anos, em termos de disponibilidade de alimentos e desnutrição (BOUAIN et al., 2014).

2.3 Absorção de P Pelas Plantas

As formas em que o P existe em solução mudam de acordo com o pH (CEROZI; FITZSIMMONS, 2016). As plantas só podem absorver P como íons fosfato livres, $H_2PO_4^-$ e HPO_4^{2-} (Pi) (BECQUER et al., 2014). O P é absorvido como íons di-hidrogenofosfato ($H_2PO_4^-$) em pH baixo do solo e como íons hidrogênio fosfato (HPO_4^{2-}) em pH alto do solo, e estes ocorrem em soluções do solo apenas em concentrações muito baixas (HAMMOND et al., 2009), devido à sua forte afinidade para combinar com cátions e argilas, levando à formação de complexos de P insolúveis, que não estão disponíveis para plantas (HINSINGER, 2001), que representa um problema para as culturas; exigindo um mecanismo de absorção muito eficiente (HAMMOND; WHITE 2008; VILAR; VILAR, 2013).

Assim sendo, plantas devem ter transportadores especializados na interface raiz/solo para extração de Pi a partir de soluções com concentrações micromolar, bem como outros mecanismos para transportar Pi através de membranas entre compartimentos intracelulares, onde as concentrações de Pi podem ser 1000 vezes maiores do que na solução do solo (SCHACHTMAN et al., 1998). Isso somado à elevada carga negativa no interior da célula, requer a geração de um elevado gradiente eletroquímico para que ocorra absorção de Pi

(SMITH, 2002). De acordo com Vilar e Vilar (2013), esse potencial é gerado pela atuação de bombas de extrusão de prótons presentes nas membranas que são ativadas por ATP, criando tanto um gradiente elétrico, quanto de pH, interior negativo e exterior ácido.

A taxa de absorção de fosfato diminui à medida que o pH da solução externa aumenta, o que é explicado pela redução na concentração de H_2PO_4^- , que é o substrato do simporte de fosfato acoplado a prótons na membrana plasmática, na faixa de pH de 5,6-8,5 (CEROZI; FITZSIMMONS, 2016); inversamente, uma diminuição no pH pode aumentar a atividade de transportadores de soluto acoplados a prótons e aumentar a captação de ânion (WHITE, 2012). Segundo Vilar e Vilar (2013), as maiores taxas de absorção de P_i ocorrem quando o pH do meio é entre 4,5 e 6,0, indicando que a forma que é mais absorvida é H_2PO_4^- , pois nesse pH esta forma predomina. Após a absorção de P_i ocorre a despolarização da plasmalema, indicando que a absorção ocorre com o simporte de um cátion, predominantemente, H^+ (VILAR; VILAR, 2013). A aquisição de P ocorre por difusão ao longo do gradiente de depleção estabelecido pela planta e, como tal, é um processo muito lento (GEMENET et al., 2016). Portanto, é importante aumentar a quantidade de P disponível o mais próximo possível das raízes, a fim de aumentar a produtividade da planta (HASH et al., 2002).

2.4 Aplicação de P em Áreas Agrícolas

Por milênios a humanidade aplicou diferentes tipos de insumos para melhorar a fertilidade do solo (ULRICH; FROSSARD, 2014). Antes da mineração em grande escala de rocha fosfática para a produção de fertilizantes, as aplicações de P na agricultura se davam através da reciclagem de estrume animal, ossos de animais esmagados, excrementos humanos e de aves, resíduos urbanos e de colheitas e cinzas (BEATON, 2006; VAN VUUREN et al., 2010). Estes resíduos eram aplicados no solo, de modo que o P era reciclado. Portanto, a dependência de insumos externos de P era pequena, resultando em um sistema agrícola sustentável (KARUNANITHI et al., 2015).

Segundo Chen e Graedel (2016), na década de 60 o fertilizante fosfatado representava 29% do total de insumo de P em solos agrícolas, incluindo terras agrícolas e pastagens, enquanto 56% do P exigido pelas culturas vinham de recursos orgânicos. Já na década de 1970, o aumento da população e a necessidade de garantir a segurança alimentar estimularam a “Revolução Verde”, que se caracterizou pela melhoria das colheitas de alto rendimento, com melhor resposta dos fertilizantes, e pela melhoria da tecnologia de irrigação (CHEN; GRAEDEL, 2016). Assim, fontes orgânicas de P foram substituídas por materiais fósseis de recursos não renováveis, isto é, guano (acúmulo de excrementos de pássaros e morcegos) e rocha fosfática (VAN VUUREN et al., 2010). Ou seja, os resíduos agrícolas foram substituídos por fertilizantes fosfatados fabricados e os agricultores deixaram de praticar a reciclagem de resíduos (CHEN; GRAEDEL, 2016). De acordo com Schröder et al. (2011), em relação à capacidade dos insumos para fornecer P, muitas vezes há uma percepção enganosa entre os agricultores de que o P de um pacote de fertilizante mineral comprado está mais disponível para as plantações do que o P proveniente de recursos orgânicos, como adubos e outros resíduos. Para os mesmos autores, essa atitude promove o uso de suplementos de fertilizantes minerais de P. A rocha fosfática fornece virtualmente todo o fertilizante de P usado em áreas agrícolas (USGS, 2008).

Ao contrário do ciclo bioquímico natural, que recicla o P de volta ao solo através de matéria vegetal morta, a agricultura industrial colhe as culturas antes da sua fase de decaimento e as transporta para a produção e consumo de alimentos em todo o mundo, o que significa que aplicações contínuas de fertilizantes ricos em P são necessárias para substituir o P que é removido do solo quando as culturas são colhidas (ASHLEY et al., 2011). Assim, o

uso desproporcional de fertilizantes de P e esterco levou a uma baixa eficiência de uso de P e, consequentemente, grandes quantidades de P excedente foram retidas como P residual nos solos (SYERS et al., 2008), haja vista a forte tendência do P aplicado ao solo reagir com componentes do mesmo, adsorvendo aos colóides (adsorção) ou formando compostos de baixa solubilidade (precipitação) com outros íons presentes no complexo de troca (fixação do P) (BEDIN et al., 2003). Então, a quantidade de P total nos solos tem pouca ou nenhuma relação com a disponibilidade de P às plantas (HAVLIN et al., 2005).

Foi sugerido que apenas 10-20% da entrada P é usada pela primeira colheita após a aplicação; assim, a maioria de P acumula-se como P residual nos solos (SATTARI et al., 2012). Como consequência, doses elevadas de fertilizantes fosfatados são necessárias para que o teor de P disponível se mantenha em níveis adequados ao desenvolvimento das plantas (GOEDERT; LOBATO, 1984). Desta forma, há preocupações em torno da longevidade e localização geopolítica das reservas de fosfato mineral, levantando o debate sobre a sustentabilidade do P a longo prazo (CORDELL et al., 2009), uma vez que os fertilizantes de P são fabricados a partir de reservas de fosfato de rocha não renováveis, que deverão ser exauridas em um futuro próximo (CORDELL et al., 2011).

2.5 Fertilizantes Fosfatados e Longevidade das Reservas de Fosfato

A produção de fertilizantes fosfatados ocorre, basicamente, pela mineração da rocha fosfática (MALAVOLTA, 1981; NOVAIS; SMYTH, 1999). No processo de produção do fertilizante, após a mineração da rocha fosfática, ocorre a concentração do P e remoção de impurezas e conversão do P a formas solúveis e de maior aproveitamento pelas plantas (PHILLIPS; WEBB, 1971).

Os fertilizantes minerais utilizados para o fornecimento de P às plantas são fosfatos naturais de origem ígnea ou sedimentar, fosfatos bicálcicos, termofosfatos e os fosfatos acidulados, também chamados de solúveis, como superfosfato triplo (STP), superfosfato simples (SSP), monofosfato de amônio (MAP) e difosfato de amônio (DAP) (NOVAIS et al., 2007). Estas fontes apresentam diferentes graus de solubilidade, característica que leva a diferenças acentuadas na velocidade de liberação para as plantas do P proveniente destas, bem como no potencial de fixação do elemento no solo (KORNDÖRFER et al., 1999).

Os fosfatos de maior reatividade, sendo mais prontamente disponíveis, favorecem a absorção e o aproveitamento do nutriente, principalmente pelas culturas de ciclo curto (rápido crescimento) (BEDIN et al., 2003). No entanto, essa rápida liberação do P pode favorecer também o processo de adsorção e precipitação das formas solúveis pelos componentes do solo, originando compostos fosfatados de baixa solubilidade e indisponibilizando o nutriente para as plantas, sendo, tal fenômeno, mais expressivo quanto maior o teor de argila no solo (LANA et al., 2014). Assim, os fertilizantes de menor reatividade, ao disponibilizarem mais lentamente o P, minimizariam os processos de fixação e poderiam favorecer uma maior eficiência de utilização do nutriente pelas culturas (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Um dos fatores que influenciam diretamente a adsorção de P é o tipo de fertilizante fosfatado usado (LOMBI et al., 2004). Aqueles com solubilidade relativamente elevada (por exemplo, superfosfatos simples e triplos, MAP e DAP) libertam P para a solução do solo mais rapidamente do que aqueles com menor solubilidade (STAUFFER et al., 2019). Contudo, a eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados é reduzida com o aumento do tempo de contato do P com os colóides do solo (LABOSKI; LAMB, 2003), reduzindo a disponibilidade deste nutriente, e, tornando necessário aplicar elevadas quantidades de fertilizante fosfatado para atender às demandas das culturas (FIGUEIREDO et al., 2012).

Como citado anteriormente, a produção de fertilizantes fosfatados ocorre, basicamente, pela mineração da rocha fosfática, consequentemente, pela baixa eficiência dos

fertilizantes fosfatados, as reservas de fosfato de rocha estão diminuindo rapidamente (STAUFFER et al., 2019). Influências antropogênicas, tais como mineração excessiva, demanda crescente, aumento de preço, restrições geopolíticas e desperdício excessivo tendem a dificultar o manejo sustentável P a nível global (CHOWDHURY et al., 2017).

A ciência, a política, a agroindústria e outros grupos interessados estão cada vez mais preocupados com o uso sustentável dos recursos de P (SCHOLZ et al., 2013), pois de acordo com Filippelli (2018) o P é o principal elemento-chave de todo o sistema alimentar global, portanto, é indispensável para o futuro da produção de alimentos. Nos últimos anos, muitos pesquisadores têm afirmado que as reservas mundiais de fosfato de rocha estão se esgotando a um ritmo alarmante, enquanto a demanda agrícola por fertilizantes fosfatados está aumentando para manter a produtividade das culturas, o que nos coloca no caminho para a escassez desse recurso essencial nas próximas décadas (BAVEYE et al., 2015; BAKER et al., 2015).

Como cerca de 90% do P derivado da rocha fosfática é utilizado na agricultura (BRUNNER, 2010), e, a demanda futura por esse recurso está vinculada, principalmente, à produção agrícola e alimentar (COOPER et al., 2011), parece cada vez mais problemático garantir a sustentabilidade a longo prazo das reservas de rocha fosfática, tendo em conta o aumento da população mundial, a expansão do consumo de produtos alimentares de origem animal e o crescente setor da bioenergia (ELSER, 2012), que por sua vez, pode desencadear uma necessidade adicional de fertilizantes fosfatados, pela decisão de cultivar culturas bioenergéticas em terras “marginais”, pobres em nutrientes, para evitar a competição com a produção de alimentos e rações e se os nutrientes presentes nos resíduos associados não forem reciclados (LOTT et al., 2009).

Espera-se que a produção mundial de alimentos aumente ainda mais nas próximas décadas (VAN VUUREN et al., 2010). As colheitas teriam que se expandir em 50% até 2030 e a produção de alimentos teria que dobrar durante o século (COOPER et al., 2011) para alcançar números suficientes para alimentar uma crescente população mundial.

Deve-se levar em consideração que os minérios de alta qualidade estão concentrados em apenas alguns países (USGS, 2008). Devido às condições específicas exigidas para a formação de rocha fosfática que raramente ocorrem em uníssono, a ocorrência de formação de rocha fosfática é limitada temporal e geograficamente, resultando em algumas formações de P massivas, que compõem o volume de reservas de rocha fosfática (FILIPPELLI, 2011). Atualmente, 85% das reservas minerais de P concentram-se em poucos países: Marrocos, Estados Unidos e China (ELSER; BENNETT, 2011). Diante dessa distribuição desigual, atualmente, um uso excessivo de P é encontrado em algumas partes do mundo, enquanto a depleção de P resulta em severas limitações de rendimento em outros lugares (OBERSTEINER et al., 2013). Foi relatado que 5,7 bilhões de hectares de terra em todo o mundo são deficientes em P (CEASAR, 2018). A união europeia, por exemplo, tem sua demanda atual de fosfato fóssil de mais de 90% coberta por importações (MCGILL, 2012). Portanto, em vista desta desigualdade geográfica da oferta e da demanda (COOPER et al., 2011), parece provável que os estoques de fosfato continuarão sendo uma questão geopolítica e que isso pode afetar a segurança futura do suprimento (REIJNDERS, 2014).

O Marrocos, com a maior parte das reservas globais, precisará aumentar a produção em cerca de 700% até 2075, a fim de suprir a maior parte desse déficit. Se isso for possível, o país obterá uma fatia muito maior da produção mundial, de cerca de 15% em 2010 para cerca de 80% até 2100, o que implica mais controle sobre os preços de mercado (COOPER et al., 2011). É provável que a produção mundial de rocha fosfática se tornará cada vez mais dominada pelo Marrocos. Assim, a menos que fontes adicionais de P possam ser acessadas ou que se aumente significativamente sua reciclagem, a segurança global do P num futuro próximo dependerá cada vez mais de um único país (COOPER et al., 2011). A China e os

EUA também têm reservas significativas, mas o minério de fosfato não é vendido no mercado global, o que limita ainda mais a fonte de suprimento para outros países (SCHOUUMANS et al., 2015). Por exemplo, nos EUA o fósforo foi designado em 2011 como um elemento de importância crucial para a segurança do país, que enfrenta possíveis gargalos na oferta (DRURY, 2013). Diante destas questões, e, devido à natureza não renovável dos recursos de P, a gestão apropriada deve ser considerada para prolongar a vida útil das reservas de fosfato (DHILLON et al., 2017), que estão se exaurindo rapidamente.

Diversos estudos apresentaram estimativas em relação a longevidade das reservas de fosfato. Cordell et al. (2009) estimou que o pico de P ocorreria por volta de 2035, e, que as reservas de fosfato durariam 100 anos. Tal pico, é geralmente entendido como o ponto no tempo em que a produção máxima global é alcançada e declina depois disso (ULRICH et al., 2014). Já para Roberts e Stewart (2002), as reservas de P durarão 343 anos às taxas atuais de produção. Van Kauwenbergh et al. (2013), estimaram que o mundo tem mais de 300 anos de reservas de P (rocha fosfática) e 1400 anos de recursos. Já, Sverdrup e Ragnarsdottir (2011) estimam que as reservas de alta qualidade acabam em 2040 e as reservas de baixo nível acabam em torno de 2340. Filippelli (2018) estima que as reservas estarão 50% esgotadas sob a atual taxa anual de extração por volta do ano 2150. Koppelaar e Weikard (2013), sugerem que as reservas de rocha fosfática são suficientes para atender a demanda até o século XXII, e podem ser estendidas até o século XXIII com medidas de redução de uso e reciclagem.

Por outro lado, para Van Vuuren et al. (2010), não há indícios de que as reservas de P se esgotarão em médio prazo, pois as estimativas feitas são baseadas em dados de produção e recursos ultrapassados, o que torna esses dados imprecisos (PANTANO et al., 2016). Van Vuuren et al. (2010) estima que em 2100, de 80 a 90% dos recursos ainda estarão disponíveis, porém, é necessário levar em conta que uma eventual falha nesta estimativa, que implicasse em um esgotamento de cerca de 50% das jazidas até 2100, já representaria uma ameaça à produção de alimentos (VAN VUUREN et al., 2010; PANTANO et al., 2016).

Segundo Cooper et al. (2011), 70% da produção global de fertilizantes é produzida atualmente a partir de reservas que serão esgotadas dentro de 100 anos, e, combinando isso com o aumento da demanda, resultará em um significativo déficit global de produção, que em 2070 será maior do que a produção atual. Para Schröder et al. (2011), as reservas de rocha fosfática de alto grau e de fácil acesso provavelmente esgotarão em 50 a 150 anos. Apesar de não haver consenso na longevidade das reservas, existe claramente o reconhecimento da limitação da rocha fosfática (FILIPPELLI, 2018).

Enquanto há um debate hoje em torno do tempo de vida das reservas de rocha fosfática ou da linha do tempo do pico de P, o que fica claro é que, com o passar do tempo, a qualidade das rochas fosfatadas utilizadas para produção de fertilizantes tem decrescido (CORDELL et al., 2009). É amplamente aceito que as reservas estão diminuindo em grau (conteúdo de % P_2O_5) e acessibilidade, e aumentando nos níveis de contaminação (radionuclídeos e metais pesados), exigindo insumos e custos adicionais de energia para extrair, produzir e enviar (SCHRÖDER et al., 2011) o que acarretará custos mais altos, pois locais relativamente inacessíveis e depósitos com alta vulnerabilidade ambiental e ecológica precisarão ser explorados (CHEN; GRAEDEL, 2016). Os altos custos de transporte e processamento do fertilizante de P geralmente tornam muito caro e difícil o acesso de muitos agricultores em países de baixa renda e com insegurança alimentar (OBERSTEINER et al., 2013). Muitos pequenos agricultores, particularmente aqueles localizados em países em desenvolvimento, são incapazes de comprar P (escassez econômica) ou o recurso não está disponível perto de suas fazendas (SCHOLZ et al., 2013) o que acarreta graves consequências em relação à segurança alimentar destas populações.

No Brasil, a maioria dos solos é altamente fixadora de P, conseqüentemente, grandes quantidades de fertilizantes de P são aplicados para superar a rápida imobilização de P

inorgânico que ocorre em solos altamente intemperizados, ricos em ferro (Fe) e alumínio (Al) (RODRIGUES et al., 2016; WITHERS et al., 2018). Segundo Rigo et al. (2019), mais de 80% dos solos brasileiros são pobres nesse nutriente. Porém, estima-se que o excedente total de P no solo represente cerca de 70% dos fertilizantes de P aplicados por ano, indicando a ineficiência do uso de P no país (WITHERS et al., 2018). Para Steffen et al. (2015) e Li et al. (2019), uma taxa de aplicação uniforme de P abaixo de 4,1 kg/ha/ano é considerada segura, já uma taxa de 4,1 a 7,5 kg P/ha/ano é tomada como transgressão do limite com o aumento do risco, mas ainda dentro da zona de incerteza, enquanto que uma taxa de P superior a 7,5 kg P/ha/ano é considerada como estando em uma zona de alto risco em relação ao recurso de P. Nos solos altamente intemperizados, que são predominantes no território brasileiro, a taxa média de aplicação de P é da ordem de 25 kg ha⁻¹ em comparação com 12 kg ha⁻¹, que corresponde a taxa média de aplicação mundial (LU; TIAN, 2017). O uso anual total de fertilizantes de P no Brasil aumentou de uma média de 0,04 teragramas (Tg) em 1960 para 2,2 Tg em 2016, podendo atingir 4,6 Tg no ano de 2050 (WITHERS et al., 2018).

Para Tollefson (2010), o Brasil pode ser considerado uma fazenda global, devido sua grande contribuição para a produção mundial de alimentos. O país é o segundo maior fornecedor global de alimentos e produtos agrícolas e é possível que, futuramente, se torne o principal fornecedor para atender a demanda global de alimentos (FAO, 2015; WITHERS et al., 2018). Estas questões reforçam a necessidade de mesclar uma futura intensificação agrícola com o uso sustentável dos recursos, em particular, o P (WITHERS et al., 2018), já que entre todos os macronutrientes, é indiscutivelmente o que apresenta a menor eficiência de uso em termos de produção agrícola (BORGES et al., 2019). Atualmente, as minas de rocha fosfática do Brasil fornecem quantidades limitadas de P pela baixa solubilidade da rocha ígnea e altos custos de processamento. Em decorrência destes fatores, cerca de 60-80 % do fertilizante fosfatado usado na agricultura brasileira é importado, portanto, possui grande dependência do mercado externo (ANDA, 2018), tornando a agricultura brasileira particularmente vulnerável à futura escassez de P (WITHERS et al., 2018).

Independente do país ou região, a realidade é que as reservas de P estão diminuindo de maneira preocupante, tanto em qualidade quanto em quantidade deste recurso (CORDELL et al., 2009; VAN VUUREN et al., 2010; FILIPPELLI, 2018). Segundo Sverdrup e Ragnarsdottir (2011), o uso atual de P é, sem dúvida, totalmente insustentável, e uma continuação das atuais práticas de desperdício representa uma ameaça à sobrevivência da civilização moderna. Para os mesmos autores, deixar de definir políticas rigorosas relacionadas a P rapidamente colocará em risco a existência continuada das nações do mundo e de suas populações.

Embora a escassez global de P seja provavelmente um dos maiores desafios do século XXI, é possível evitar uma crise com ação concertada (CORDELL et al., 2011). Uma razão para tal otimismo é que o atual sistema de produção e consumo de alimentos é altamente ineficiente em relação ao uso de P, o que significa que existem oportunidades substanciais para melhorar o uso e a reutilização eficientes (CORDELL et al., 2011). Estratégias alternativas de gestão para reduzir a dependência da mineração de P, e, usar o P de maneira mais eficiente, se tornarão cada vez mais importantes para que os sistemas agrícolas sejam sustentáveis no futuro (WITHERS et al., 2018). Limitar o consumo de P a usos essenciais, aumentar a eficiência do uso agrícola e aumentar a reciclagem de P pode contribuir substancialmente para a redução da demanda por recursos fósseis (REIJNDERS, 2014), e, portanto, podem adiar o esgotamento das reservas globais (CORDELL et al., 2009), o que é particularmente importante, principalmente, para regiões altamente dependentes de importações (ASHLEY et al., 2011).

2.6 Estratégias Para Sustentabilidade do P em Solos Agrícolas

Um aspecto essencial da resolução dos problemas relacionados a futura escassez de fosfato é aumentar a eficiência do uso de P na agricultura, reduzindo assim o impacto ambiental negativo da agricultura e ajudando a garantir o uso sustentável de recursos de P (SCHRÖDER et al., 2011; FRYDENVANG et al., 2015). No entanto, não há uma solução única para alcançar um ciclo sustentável de P (CORDELL et al., 2011). Além de aumentar a eficiência do seu uso, o P precisará ser recuperado e reutilizado de todos os fluxos atuais de resíduos do sistema de produção e consumo de alimentos (CORDELL et al., 2011). Medidas sustentáveis destinadas a recuperar e reutilizar o P no sistema alimentar podem variar desde soluções de baixa tecnologia e pequena escala até soluções de alta tecnologia em larga escala (ASHLEY et al., 2011). Withers et al. (2015) propuseram a implementação de um pacote de estratégias e medidas de gestão para o P. Estas estratégias (5R) são: (1) realinhar os insumos de P para atender apenas aos requisitos essenciais, (2) reduzir as perdas de P à água, (3) reciclar os recursos biológicos de forma mais eficaz, (4) recuperar o P nos resíduos e (5) redefinir os sistemas alimentares. Para os autores, estas estratégias trarão potenciais benefícios para a segurança alimentar, energética e hídrica, saúde humana, gestão global de recursos, meio ambiente e biodiversidade.

O uso de P pode ser melhorado aumentando a eficiência no ambiente solo-planta (SIMPSON et al., 2011). Diversos pesquisadores propuseram alternativas para aumentar eficiência de uso do P pelo manejo de plantas, solo, fertilizantes, resíduos animais, excrementos humanos, reciclagem industrial e gestão de mineração (CORDELL et al., 2009; VAN VUUREN et al., 2010; RICHARDSON et al., 2011; KARUNANITHI et al., 2015; GEORGE et al., 2018). De acordo com Pantano et al. (2016), é necessário aprimorar as práticas de aplicação dos fertilizantes, implementar o reuso seguro de resíduos orgânicos, esterco e excrementos de animais e humanos, bem como desenvolver métodos para a recuperação de P presente em águas residuárias e corpos aquáticos eutrofizados. Além disso, a modificação do crescimento e arquitetura das raízes, através da manipulação de exsudatos radiculares, ou pelo gerenciamento de associações entre plantas e microrganismos, como fungos micorrízicos arbusculares e inoculantes microbianos, podem melhorar a eficiência no manejo do P (BAVEYE, 2015; RICHARDSON et al., 2011). Para Cooper et al. (2011), ser mais eficiente no uso e reutilização de P torna o país menos dependente de importações e, portanto, aumenta sua segurança de suprimento.

Deve-se reduzir a dependência de fertilizantes inorgânicos de P, e, estratégias para fazer isso aumentarão a relevância do P orgânico do solo para a nutrição das plantas (GEORGE et al., 2018). Acessar o P orgânico pode diminuir a dependência de fertilizantes sintéticos, reduzindo a curto e médio prazo a necessidade de adições continuadas de P (HAYGARTH et al., 2013; GEORGE et al., 2018). A capacidade de utilizar P orgânico para sustentar a produtividade agrônômica com o declínio dos insumos convencionais de fertilizantes conduz à pesquisa das interações entre o P orgânico, uso e manejo da terra (NASH et al., 2014). Portanto, compreender as relações e interações das variadas formas de P nos solos e os numerosos fatores que influenciam sua disponibilidade é essencial para o manejo eficiente de P (HAVLIN et al., 2005).

2.7 Formas e Dinâmica do Fósforo no Solo

No que se refere à fertilidade do solo, o P apresenta três problemas principais: o primeiro é com relação ao seu baixo teor no solo, o segundo problema diz respeito à baixa solubilidade dos compostos de P comumente encontrados nos solos, tornando-o muito pouco disponível à absorção pelas plantas e o terceiro problema diz respeito às mudanças para

formas não-lábeis (fixação), quando fontes solúveis de P, na forma de fertilizantes e resíduos orgânicos, são adicionadas ao solo (ROLIM NETO et al., 2004).

O P se movimenta pouco na maioria dos solos, permanecendo, geralmente onde é aplicado, seja por intemperismo dos minerais, seja por adubação, e, raramente é perdido por lixiviação, mesmo que este tenha maior mobilidade em solos arenosos (KLEIN; AGNE, 2012). Quase todo o P se movimenta por difusão, sendo um processo lento e que depende da umidade (KLEIN; AGNE, 2012).

Na solução do solo, o P ocorre nas formas aniônicas (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}), cujas concentrações variam em função do pH (LEITE, 2015). Em regiões tropicais, onde prevalecem os solos ácidos, o P da solução ocorre quase que exclusivamente na forma de H_2PO_4^- (HAVLIN et al., 2005). O P em solução é mantido pelo P adsorvido na superfície das partículas sólidas do solo ou oriundo da dissolução de minerais primários e da decomposição da matéria orgânica (LEITE, 2015). O equilíbrio entre o P-solução e o P-sólido é dependente da concentração dos íons fosfato na solução, da quantidade de P na fase sólida e da resistência do solo em desorver P [fator intensidade (I), fator quantidade (Q) e fator capacidade de P ou poder tampão (Q/I), respectivamente] (NOVAIS et al., 2007).

De acordo com seu grau de estabilidade ou solubilidade, as formas de P apresentam-se em diferentes graus de disponibilidades de absorção às plantas, com sua dinâmica associada aos fatores ambientais que regulam a atividade dos microrganismos (imobilização ou liberação de P) e às propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo (CARNEIRO et al., 2011). Uma maneira de compreender a dinâmica do P é dividi-lo em frações, pelo uso de soluções extratoras de diferentes composições e capacidades de extração, dada a complexidade do comportamento desse elemento no solo (SILVA; RAIJ, 1999).

Gatiboni et al. (2007), mencionam que o P do solo é distribuído em formas que variam com a natureza química do ligante e a energia de ligação entre o solo e este elemento, com diferentes capacidades de desorção e abastecimento da solução do solo. Do ponto de vista da fertilidade do solo, o P é dividido de acordo com a facilidade com que repõe a solução do solo (SANTOS et al., 2008a), sendo distribuído em formas lábeis, moderadamente lábeis e pouco lábeis (GATIBONI et al., 2005). Esta divisão esclarece os compartimentos de P no solo com maior ou menor capacidade de suprimento à solução do solo (GATIBONI et al., 2013), portanto, ajuda no entendimento da dinâmica da disponibilidade do P. O conjunto de compostos capazes de repor P rapidamente na solução do solo, quando este é absorvido por plantas ou microrganismos, representa a fração lábil de P (P-lábil) (LEITE, 2015). Por outro lado, os compostos de baixa solubilidade, precipitados ou fixados, formas que são pouco ou nada reversíveis, representam a fração não-lábil de P (P-não lábil) (NOVAIS et al., 2007).

A disponibilidade e mobilidade do P nos solos também dependem de suas formas químicas (YANG et al., 2013). Para entender a sua dinâmica, o P do solo é dividido em dois grandes grupos, P inorgânico (Pi) e P orgânico (Po), dependendo da natureza do composto a que está ligado (SANTOS et al., 2008a). Estas formas de P diferem em seu comportamento e destino nos solos (TURNER et al., 2007).

A porção inorgânica (Pi) compreende o íon fosfato na solução do solo, todas as formas precipitadas com Al, Fe e Ca e adsorvidas aos oxi-hidróxidos de Fe e de Al da fração argila e, ainda, as formas estruturais dos minerais fosfatados (GATIBONI et al., 2013), podendo ser separado em duas partes: o P dos minerais primários ou estrutural e o P adsorvido, além do P na solução do solo, que se encontra em baixa concentração (GATIBONI, 2003). Já a fração orgânica (Po) representa o P presente como constituinte de compostos orgânicos, isto é, aqueles que contêm ligações carbono-hidrogênio (TURNER et al., 2005). Pode constituir de 5 a 80% do P total do solo, e, nos solos tropicais, é fonte de P às plantas e deve ser levado em consideração em estudos envolvendo a sua dinâmica e a biodisponibilidade (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2003). Em solos altamente intemperizados, que possuem

características como: maior eletropositividade, menor capacidade de troca de cátions, aumento da adsorção aniônica, diminuição da saturação por cátions básicos, dentre outras, predominam as formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia e as formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente (SANTOS et al., 2008a; PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Em geral, formas orgânicas de P têm uma menor afinidade com a fase sólida do solo em comparação com formas inorgânicas, desta forma, apresenta maior mobilidade no solo e menor susceptibilidade às reações de adsorção (CARNEIRO et al., 2011). Portanto, constitui-se em uma importante fonte desse nutriente às plantas por meio de sua mineralização (DUDA et al., 2006). Estas características aumentaram o interesse científico em acessar P orgânico para a produção de plantas, diminuindo assim a dependência de fertilizantes inorgânicos e aumentando a relevância do P orgânico do solo (HAYGARTH et al., 2013; GEORGE et al., 2018).

2.8 Fosforo Orgânico e Sua Importância na Nutrição de Plantas

O P orgânico (Po) é originário principalmente de processos biológicos que envolvem a assimilação de ortofosfato e subsequente liberação à medida que os resíduos vegetais e animais adicionados ao solo e materiais microbianos amadurecem e se decompõem (CONDRON et al., 2005; MARTINAZZO et al., 2007). Pode ser classificado com base na natureza da ligação do P (TURNER et al., 2005). Na maioria dos solos, ocorre como uma mistura de monoésteres de fosfato (por exemplo, mononucleotídeos, fosfatos de inositol) e diésteres de fosfato (principalmente ácidos nucleicos e fosfolipídios), com quantidades menores de fosfonatos (compostos com ligação direta carbono-fósforo) e polifosfatos orgânicos (por exemplo, adenosina trifosfato) (TURNER; ENGELBRECHT, 2011). Os ésteres de fosfato são subclassificados de acordo com o número de grupos éster ligados a cada fosfato. Dessa forma, os monoésteres de fosfato têm uma porção de carbono por P, enquanto os diésteres de fosfato têm dois (TURNER et al., 2005).

Os monoésteres de fosfato são o grupo dominante de compostos orgânicos de P (até 80% do Po total) na maioria dos solos (CONDRON et al., 2005), ocorrendo, principalmente, como fosfatos de Inositol (TURNER et al., 2002). Outros monoésteres de fosfato presentes em pequenas quantidades no solo incluem fosfatos de açúcar, fosfoproteínas e mononucleotídeos (TURNER et al., 2005). Já os diésteres de fosfato incluem ácidos nucleicos, fosfolipídios e ácidos teicóicos, que constituem menos de 10% do fósforo orgânico do solo (TURNER et al., 2003).

A relativa labilidade e acumulação destes diferentes grupos varia no ambiente (DARCH et al., 2014). Alguns compostos, como ácidos nucleicos e fosfolipídios com ligação diéster, possuem estrutura química que facilita sua decomposição, sendo facilmente mineralizáveis e, por isso, as quantidades armazenadas no solo são pequenas (SANTOS et al., 2008a). Já os fosfatos monoésteres, como o fosfato de inositol, apresentam alta energia de ligação com a estrutura química da molécula e alta carga residual, o que lhes confere facilidade de interação com os constituintes inorgânicos do solo (SANTOS et al., 2008a). Isso dificulta a mineralização e favorece o acúmulo no solo, sendo de baixa labilidade e disponibilidade às plantas (RHEINHEIMER et al., 2002; RICHARDSON et al., 2011). Conseqüentemente, Po representa uma grande parte do P total do solo, e, pode ser transformado em P lábil através de um processo contínuo de degradação por enzimas do solo (GEORGE et al., 2018). Em alguns estudos, a maior parte do P total foi atribuída ao P orgânico fixada na serapilheira e nos organismos vivos da rizosfera, e apenas 10-24% estava presente como P inorgânico (ZAVIŠIĆ et al., 2016; LANG, et al., 2017). Portanto, o P orgânico pode ser uma importante fonte de P disponível durante a degradação da serapilheira

de raízes e folhas, bem como microrganismos mortos e matéria orgânica do solo (SHEN et al., 2011).

Em ambientes naturais, após a mineralização, o Po é uma fonte de P para plantas, que ocorre principalmente em solos altamente intemperizados como o tropical e o subtropical e em solos cultivados com baixa disponibilidade de P (VINCENT et al., 2010; GATIBONI et al., 2005), uma vez que a ciclagem de formas orgânicas mais lábeis é acelerada (SILVA; MENDONÇA, 2007). Nesses solos, o conteúdo de Po é maior naqueles mais argilosos, com maior teor de C orgânico e menor pH (CADE-MENUN, 2005; CUNHA et al., 2007; ZAIA et al., 2008b). Segundo Thien e Myers (1992), em solos nestas condições, o Po lábil contribui expressivamente para o índice de biodisponibilidade do P, com magnitude maior que o P inorgânico.

A mineralização do Po no solo é governada por uma série de fatores abióticos e bióticos, em especial pelas condições ambientais que interferem na densidade e atividade microbiana e pela mineralogia do solo (ZAIA, 2005; GEORGE et al., 2007). Ao se tratar especificamente do fator biótico, os microrganismos afetam a dinâmica do P no solo não apenas pela mineralização de compostos orgânicos, uma vez que o ciclo de P no solo é controlado principalmente pela atividade microbiana (YEVDOKIMOV et al., 2016). Dessa forma, muitos dos processos que regulam a disponibilidade de P são mediados pelos microrganismos, como a solubilização do P através da secreção de ácidos orgânicos e inorgânicos, a decomposição da matéria orgânica do solo (e associada à mineralização de P ou a imobilização do excesso de P na biomassa microbiana, que pode ser subsequentemente liberada) e a liberação de P por hidrólise catalisada por enzimas extracelulares (QIU et al., 2010; TENG et al., 2018; ZHU et al., 2018).

Todos os compostos de Po possuem uma gama de ligações químicas, e, requerem enzimas catalíticas específicas para torná-los biologicamente disponíveis na forma de ortofosfato (GEORGE et al., 2018). A hidrólise de Po é mediada pela ação de um conjunto de enzimas fosfatase que pode ter especificidade para compostos isolados ou ampla especificidade para uma variedade de compostos (GEORGE et al., 2007), incluindo fosfomonoesterase, fosfodiesterase e fitase (STEIDINGER et al., 2015). Estas fosfatases extracelulares podem ser produzidas e liberadas por microrganismos e raízes de plantas, mediando a clivagem de Pi a partir do Po (HINSINGER et al., 2015). Bünemann (2008) relataram que até 60% do Po total pode ser hidrolisado por fosfatases, com as maiores quantidades sendo liberadas por fitases. Sua produção é resultado de modificações bioquímicas a nível celular desencadeadas pela diminuição da absorção de P pelos organismos (RHAGHOTHAMA, 1999), sendo negativamente relacionada com a presença de P disponível (SINSABAUGH et al., 2008). Portanto, sua atividade é mais elevada em solos com baixa disponibilidade de Pi (GATIBONI et al., 2008; HOFMANN et al., 2016).

O grupo dominante destas enzimas são as fosfomonoesterases (NANNIPIERI et al., 2011), que, em função de seu pH ótimo, podem ser separadas em fosfomonoesterases ácida e alcalina (HOFMANN et al., 2016). Embora os microrganismos sejam capazes de produzir fosfomonoesterases ácidas e alcalinas que têm um pH ótimo mais amplo e também são ativos em pH elevado do solo, plantas só podem produzir fosfomonoesterases ácidas (NANNIPIERI et al., 2011; HOFMANN et al., 2016). Assim, tanto a fosfatase microbiana quanto a vegetal são eficazes na liberação de ortofosfato a partir do Po do solo, com algumas evidências de que as enzimas microbianas apresentam maior eficiência para liberação de P (TARAFDAR et al., 2001). Além disso, o número e a atividade de bactérias e fungos são significativamente maiores dentro da rizosfera. Estes fatores, aliados ao curto tempo de vida dos microrganismos, com várias gerações por ano, permite a produção e a liberação de quantidades elevadas de enzimas extracelulares em comparação com as plantas (DICK; TABATABAI, 1993).

Chen et al. (2002), em seu estudo, verificaram que a depleção de Po no solo foi intimamente associada a um aumento significativo na atividade das fosfatases mono e diéster. Turner e Wright (2014) relataram que, apesar de uma década de fertilização com P e um aumento acentuado de P extraível no solo em uma floresta tropical, a atividade da fosfatase permaneceu relativamente alta. Hofmann et al. (2016) verificaram que plantas de *Fagus sylvatica* L. reagiram à diminuição da disponibilidade de P com um aumento do investimento em recursos na reciclagem de Po, tanto pela reabsorção de P quanto pela liberação de fosfatases extracelulares. Por outro lado, a atividade da fosfatase microbiana não respondeu à fertilização com P e foi alta no solo rico em P, provavelmente porque também foi controlada pela disponibilidade de C. Para os autores, isso indica que os microrganismos podem desempenhar um papel mais importante na reciclagem orgânica de P em solos ricos em P. Para Conte et al. (2002), o Po pode ser disponibilizado para as plantas pela atividade de fosfatase ácida, mesmo com altas adições de fertilizantes fosfatados ao solo, mas sua importância deve ser maior em sistemas com baixo uso de insumos, por sua maior participação no atendimento da demanda de P pelas culturas. De acordo com Tran et al. (2010), o melhor conhecimento a respeito das fosfatases secretadas por plantas privadas de Pi podem ajudar a desenvolver estratégias para a engenharia de culturas eficientes em P, minimizando assim o uso de fertilizantes fosfatados, insustentáveis na agricultura.

Uma das frações importantes de Po do solo é aquela contida na biomassa microbiana (P microbiano) por sua rápida dinâmica (GATIBONI, 2003). Os microrganismos são responsáveis pelo armazenamento de P através da imobilização em seus tecidos, evitando a adsorção de P nos colóides inorgânicos do solo (RHEINHEIMER et al., 2019). Após a senescência, morte e lise celular desses organismos, o P torna-se parte do Po do solo, sendo mineralizado e disponível para a solução do solo, servindo como uma reserva de P disponível no curto e no médio prazo, podendo ser absorvido pelas plantas (MARTINAZZO et al., 2007; DARCH et al., 2014; BÜNEMANN, 2015). O P imobilizado na biomassa microbiana pode ser liberado pela ruptura das células microbianas, promovida por variações climáticas e de manejo de solo, e, também, por causa das interações com a microfauna que, ao se alimentar de microrganismos, libera diversos nutrientes no solo (BUCHANAN; KING, 1992). Quantidades significativas de P também podem ser liberadas dos microrganismos do solo sem alteração líquida no tamanho do reservatório da biomassa microbiana devido à reciclagem e rotatividade (RICHARDSON; SIMPSON, 2011). Estudos de marcadores radioativos indicam que o ortofosfato liberado por meio da renovação microbiana contribui significativamente para as taxas basais de mineralização no solo, significativas para o fornecimento de ortofosfato às plantas (RICHARDSON; SIMPSON, 2011).

Do P intracelular microbiano, mais de 60% geralmente está na forma de ácidos nucleicos, 20% em ésteres de P solúveis em ácido e 5% em fosfolipídios (WEBLEY; JONES, 1971). Sendo a quantidade de P disponível liberado pela fumigação com clorofórmio intimamente relacionada ao conteúdo de P da biomassa microbiana do solo (MARUMOTO, 1984). Estima-se que o P microbiano no solo, embora altamente variável, represente tipicamente cerca de 2% a 10% do P total do solo, embora em diferentes estágios de desenvolvimento do solo e nas camadas de serapilheira (superfície do solo) isso possa chegar a 50% (ACHAT et al., 2010; RICHARDSON; SIMPSON, 2011). Segundo Oliveira et al. (2011), o P microbiano é a maior e mais importante fonte de reserva potencial de P para o crescimento e desenvolvimento das plantas em ecossistemas naturais, sem a adição de fertilizantes fosfatados. É geralmente equivalente a, ou excede o que está contido na biomassa vegetal; podendo atingir valores equivalentes ou superiores aos necessários às plantas (SANTOS et al., 2008a).

Por outro lado, em seu estudo, Gatiboni et al. (2008), avaliando o conteúdo de P armazenado na biomassa microbiana e a atividade de fosfatases ácidas, durante a diminuição

dos teores de P disponível no solo, concluíram que com a diminuição da disponibilidade de P do solo, a quantidade armazenada na biomassa microbiana do solo diminuiu, e a atividade de fosfatases ácidas aumentou. Martinazzo et al. (2007), estudando um Latossolo sob sistema plantio direto, observaram que a imobilização do P pela biomassa microbiana do solo é temporária, e, diminui ao longo do desenvolvimento das culturas, e sua variação temporal não é acompanhada por variações no P extraído pela resina trocadora de ânions. Assim, em condições de baixa disponibilidade de P e, principalmente, baixa deposição de resíduos vegetais no solo, a biomassa microbiana é um compartimento que retém pouco P do solo, com pouca influência sobre a disponibilidade de P às plantas e pode, inclusive, competir com estas pelo pouco P disponível na solução do solo (GATIBONI et al., 2008).

Plantas e microrganismos também podem solubilizar o P orgânico do solo secretando ácidos orgânicos de baixo peso molecular, incluindo acetato, lactato, oxalato, citrato e malato (BEGUM; TOFAZZAL, 2005; GUPPY et al., 2005). O ácido orgânico liberado no solo pode manipular a disponibilidade de P indiretamente, promovendo o crescimento de microrganismos e a subsequente mineralização do Po (RICHARDSON, 1994), ou diretamente, induzindo mudanças no pH da rizosfera; alterando o equilíbrio químico em solução do solo e induzindo a dissolução de minerais P pouco solúveis; alterando as características da superfície de partículas minerais; competindo com fosfato nos locais de sorção e complexando e quelando cátions que estão ligados a P (KHADEMI et al., 2010). Sendo a eficácia dos ácidos orgânicos na mobilização do P no solo dependente do número de grupos carboxílico que eles possuem, com tendência de seguir as séries tricarboxílico>dicarboxílico>ácido monocarboxílico (KHADEMI et al., 2010). Segundo Nagarajah et al. (1970), a mobilização de P é maior para citrato (tricarboxílico/ácido) seguido de oxalato (ácido dicarboxílico), com malato, malonato e tartarato sendo moderadamente eficaz, e, succinato, fumarato, acetato e lactato sendo os menos efetivos.

As concentrações de ácido orgânico são maiores quando as formas orgânica e ocluída de P compreendem uma grande proporção do P total do solo (AOKI et al., 2012). Gang et al. (2012) verificaram que a adição de ácidos orgânicos, especialmente citrato, aumentou significativamente o teor de P disponível. De acordo com os autores, os ácidos orgânicos liberados podem aumentar a solubilidade de alguns dos reservatórios mais estáveis de P, o que pode ser importante para a disponibilidade de P do solo. Resultados obtidos por Khademi et al. (2010) revelaram que os ácidos orgânicos solubilizam quantidades significativas de P do solo, tornando o nutriente mais acessível às raízes das plantas. Segundo os autores, a adição de oxalato à rizosfera melhorou significativamente a absorção de P na cultura do trigo, enquanto o citrato teve um impacto menor na absorção de P pelas plantas. Para Tiecher et al. (2012), os ácidos orgânicos podem proporcionar maior estímulo ao crescimento e desenvolvimento da biomassa microbiana do solo, resultando em maior teor de P armazenado na biomassa microbiana, que, posteriormente, pode ser disponibilizado para absorção pelas plantas.

A mobilização de Po por dissolução promovida através de ácidos orgânicos é maior do que a mobilização de Pi (GOEBEL et al., 2017). Assim, o Po pode estar altamente disponível na rizosfera após a exsudação do ácido orgânico (SCHEERER et al., 2019). Ao ser solubilizado, o Po deve ser hidrolisado pelas enzimas fosfatases para liberar fosfato inorgânico para absorção da planta (NASH et al., 2014). Segundo Darch et al. (2016) o Po do solo pode ser solubilizado e hidrolisado por uma combinação de ácidos orgânicos e enzimas fosfatase em solos de florestas tropicais, indicando que essa via pode contribuir significativamente para a aquisição biológica de P.

Como a maioria dos solos brasileiros são altamente fixadores de P, grandes quantidades de fertilizantes além da captação de P da safra são regularmente aplicadas para superar a rápida imobilização do P inorgânico que ocorre em solos altamente intemperizados,

ricos em ferro (Fe) e alumínio (Al) (WITHERS et al., 2018; RODRIGUES et al., 2016). Portanto, é importante compreender o ciclo de P no solo para desenvolver estratégias de manejo que aumentam a disponibilidade de P nas plantas, principalmente em sistemas de produção com baixo insumo. Diante disso, tem aumentado o interesse dos pesquisadores brasileiros no uso de Po também como bioindicador de fertilidade do solo (DUDA et al., 2013).

Diversos autores têm estudado a contribuição do Po na nutrição de plantas. De acordo com Tiessen et al. (1984), em solos pouco intemperizados, a contribuição do Po é de 14% na nutrição das plantas, enquanto nos solos mais velhos pode chegar a 80%. Já, Gatiboni et al. (2005) relatam que, em solos adubados, a contribuição do Po para a nutrição das plantas foi de 6%, e aumentou para 43% no solo sem adição de fertilizantes minerais. Gama-Rodrigues et al. (2014), avaliando as interações entre os reservatórios de P, identificando quais reservatórios atuam como dreno ou fonte de P em solos não fertilizados, observaram que o reservatório de Po foi a principal fonte do reservatório de P disponível. Rita et al. (2013), estimando a mineralização do Po total e lábil em diferentes classes de agregados de solos cultivados com leguminosas arbóreas, pastagens e capoeira (floresta secundária) num Latossolo Vermelho-Amarelo, verificaram que o potencial de mineralização do Po no solo variou com os tratamentos. Segundo os autores, como no estudo o Po era a forma predominante na composição total de P lábil, a disponibilidade de P para as plantas foi intimamente relacionada à mineralização do Po lábil. Oliveira et al. (2014), avaliando o teor de Po total e lábil em horizontes diagnósticos da superfície de diferentes tipos de solo, verificaram que o Po representou, em média, 36 a 46% do total de P extraído e mais de 70% do P lábil em todos os horizontes diagnósticos.

Oliveira Filho et al. (2017), ao avaliarem a adsorção de P e alterações nas concentrações de formas orgânicas e inorgânicas de P em um Neossolo Quartzarênico após 9 anos de cultivo sucessivo com cana-de-açúcar, concluíram que o Po se acumulou predominantemente na fração Po bic (extraído com bicarbonato de sódio) nas áreas estudadas. De acordo com os autores, a mineralização dessa fração pode representar uma importante fonte de P para as plantas. Cunha et al. (2007), ao estimarem o conteúdo de Po total e as frações lábeis de P no solo de florestas montanas, pastagens e eucalipto no Norte Fluminense, verificaram que o Po representou de 14,6 a 36,9 % do P total extraído. Além disso, em relação ao P lábil, os autores concluíram que o Po representou mais de 80 % nos solos sob florestas naturais e 65 % no solo sob eucalipto e que o Po (total e lábil) correlacionou-se positivamente com o C orgânico, e o Po lábil com o P disponível. Também no Norte Fluminense, Zaia et al. (2008a), estimando os teores de fósforo de compostos orgânicos (Po-total, Po lábil e P microbiano do solo), em plantios de *Acacia auriculiformis* (acácia) e *Mimosa caesalpiniiifolia* (sabiá), em floresta secundária e em pastagem, verificaram que a fração Po lábil foi maior do que Pi lábil. Também, no solo sob capoeira, 71,9 % do P lábil foi constituído por Po lábil, enquanto, para as demais coberturas, variou de 64,6 a 67,9 %. Com o P disponível correlacionando-se positivamente com o C e o P da biomassa microbiana.

Duda et al. (2013), ao verificarem a influência do reservatório de P biodisponível sobre a disponibilidade do elemento para as plantas (*Brachiaria decumbens* Stapf) em 14 amostras pertencentes a algumas classes de solos do Brasil, concluíram que os teores de Po lábil e P microbiano, juntos, foram maiores que o Pi lábil, na maiorias das amostras de solos. Também verificaram que a acumulação de P na parte aérea da *B. decumbens* mostrou-se positivamente relacionada com o reservatório biodisponível deste elemento e, que, os solos que apresentaram teores mais elevados de Po solúvel em ácido e Po total proporcionaram maior acumulação de P pela planta. Xavier et al. (2009), ao avaliarem os impactos da adubação orgânica e do uso de adubo verde nas diferentes frações de P do solo em áreas sob agricultura orgânica no Ceará, concluíram que o reservatório de P orgânico representou mais de 50% do

total de P do solo em todas as áreas avaliadas, mostrando que as formas orgânicas de P têm um papel vital na ciclagem e nutrição das plantas. Segundo os autores, a contribuição da fração orgânica no suprimento de P e na sustentabilidade dos sistemas agrícolas pode ser tão importante quanto as formas inorgânicas de P.

Na região sul do Brasil, Schoninger et al. (2012), ao avaliarem alterações no pH do solo e no conteúdo de formas de P na rizosfera de solos fertilizados com fosfato de rocha como resultado do cultivo de espécies de plantas, verificaram que o cultivo das plantas (*Glycine max* (L.) Merrill, capim brachiaria – *Brachiaria brizantha* (Hochst) Stapf, painço - *Pennisetum glaucum* (L.) R. Brown e sorgo - *Sorghum bicolor* (L.) não influenciaram o conteúdo de Po lábil (extraído com Bicarbonato de Sódio - Po bic). Segundo os autores, o Po bic é uma forma de P associada à biomassa microbiana do solo e seu esgotamento ocorre principalmente quando o conteúdo de P resina e Pi bic não são suficientes para suprir a demanda das culturas. Ainda, de acordo com os autores, como a disponibilidade de Pi nas camadas mais próximas às raízes não era limitante e o carbono orgânico derivado das raízes estimula o crescimento e a atividade microbiana na rizosfera, não apenas a manutenção do conteúdo de Po bic é possível, mas também a elevação dos conteúdos desta forma de P; podendo ser uma fonte importante de P a medida que os teores de P inorgânico diminuem ao decorrer dos cultivos.

Também no Sul do Brasil, Tiecher et al. (2012), ao avaliarem o efeito do longo período de cultivo de diferentes espécies de inverno sob diferentes sistemas de manejo do solo na distribuição das formas orgânicas de P no solo, no teor de P armazenado na biomassa microbiana do solo e na atividade da enzima fosfatase ácida, observaram que o cultivo do solo com aplicação racional de fertilizantes fosfatados e a manutenção de altos níveis de carbono orgânico no solo, resultou no acúmulo de P na forma orgânica. Os autores concluíram que cultivo de plantas durante o período de inverno em solos subtropicais altamente intemperizados aumenta a importância das reações biológicas do ciclo P, especialmente em solos com grande quantidade de resíduos de culturas depositada na superfície. De acordo com os autores, isso também contribui para a prevenção da sorção de fosfato inorgânico pelos colóides do solo, aumenta o conteúdo de Po, o conteúdo de P armazenado na biomassa microbiana e a atividade da enzima fosfatase ácida.

Guerra et al. (1996), ao estimarem o conteúdo de Po total e sua fração lábil de amostras superficiais de solos compreendendo diferentes classes, verificaram que o conteúdo de Po total variou de 7 até 272 mg/kg de solo. O Po lábil variou de 6 até 35 mg/kg de solo, preponderando amplamente sobre o Pi lábil e correspondendo, em média, a 26% do Po total do solo. Aleixo et al. (2019), ao determinarem o Po em solo sob diferentes sistemas agroflorestais de cacau (*Theobroma cacao* L.) no Sul do estado da Bahia, verificaram altas concentrações de espécies de Po e pirofosfato no solo, revelando um alto potencial de suprimento de P às plantas em caso de supressão da fertilização inorgânica com fosfatos nos sistemas agroflorestais estudados. Além disso, os autores concluíram que o P disponível se correlacionou positivamente com o Po (total, lábil e microbiano), e o Po total com o P microbiano e que o Po lábil predominou amplamente sobre a fração inorgânica lábil, especialmente no grupo de Latossolos.

2.9 Fósforo em Solos Sob Sistemas Conservacionistas de Manejo

Diferentes sistemas de uso e manejo dos solos podem interferir na qualidade nutricional do solo e, mais especificamente, na dinâmica do P, podendo promover alterações dos compartimentos deste macronutriente (MATOS et al., 2006). Estas mudanças podem variar de acordo com o manejo adotado para cada tipo de solo, da quantidade do nutriente exportado na colheita, de sua taxa de reposição dentro do agrossistema e da habilidade das

plantas em utilizar as reservas de P nas formas consideradas menos lábeis (TIECHER et al., 2012). A adoção de práticas de manejo conservacionistas normalmente tem efeito positivo sobre o teor e a qualidade da matéria orgânica do solo (BAYER; MIELNICZUK, 1997), com reflexos diretos ou indiretos sobre as características químicas e disponibilidade de nutrientes (FRAZÃO et al., 2008). Esse tipo de sistema de cultivo reduz o revolvimento do solo, favorecendo a recuperação das propriedades físicas e químicas, antes deterioradas pelo sistema de cultivo intensivo ou convencional (LIMA et al., 2007).

Sistemas conservacionistas podem reduzir substancialmente as perdas de solo por erosão se comparado com os sistemas de preparo convencional (COGO et al., 2003), pois estes sistemas de manejo proporcionam acúmulo de resíduos na superfície do solo, aumenta a agregação e conseqüentemente promove a proteção física da matéria orgânica do solo (SÁ et al., 2001). Assim, a perda de água e sedimentos é reduzida, o que diminui as perdas totais de nutrientes por erosão nesses sistemas de manejo; (SCHICK et al., 2000). Segundo Bertol et al. (2007), a ausência de manejo intensivo do solo permite a manutenção da matéria orgânica, o que diminui a perda de solo, água e de nutrientes como P, K, Ca e Mg.

A dinâmica do Po está estreitamente associada à dinâmica da matéria orgânica do solo (CUNHA et al., 2007). Agroecossistemas acumuladores de matéria orgânica e de baixos insumos, como são os sistemas conservacionistas, seriam capazes de manter adequadamente a disponibilidade de P no solo, mediante a mineralização de Po (GAMA-RODRIGUES et al., 2007). A mineralização lenta e gradual da matéria orgânica em sistemas conservacionistas proporciona a liberação e a redistribuição das formas orgânicas de P, mais móveis no solo e menos suscetíveis às reações de adsorção (CARNEIRO et al., 2011), além de manter um fluxo contínuo de diferentes formas de C, as quais competem com os íons fosfato pelos sítios de carga positiva dos coloides inorgânicos e complexam íons de Al^{3+} e Fe^{3+} , formando compostos hidrossolúveis complexos e estáveis, resultando em aumento da disponibilidade de P (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2003).

Diversos autores têm avaliado a influência de sistemas de manejos conservacionistas e convencional na dinâmica do fósforo no solo. Xavier et al. (2011), ao avaliarem as frações de P em diferentes agroecossistemas, verificaram que a distribuição desse nutriente nos compartimentos orgânicos e inorgânicos foi dependente das características específicas de cada agroecossistema. Schick et al. (2000) verificaram que em sistemas conservacionistas, nos quais ocorrem menores perdas totais de água e sedimentos do que nos preparos convencionais, as perdas totais de P em geral foram menores, apesar da maior concentração desse elemento na superfície do solo nos sistemas conservacionistas. Bertol et al. (2004), ao quantificar as perdas de P na água e nos sedimentos da erosão hídrica sob chuva natural, verificaram que as concentrações de P foram maiores nos sistemas de manejo de solo conservacionistas em relação aos sistemas.

Tokura et al. (2002) ao estudar as alterações das formas de P em decorrência de diferentes sistemas de manejo, verificaram que sistemas mais conservacionistas proporcionam maior disponibilidade de P no solo. Silva et al. (2015), ao avaliarem as alterações nos atributos físicos, químicos e biológicos de solos sob diferentes sistemas de cultivo, observaram que os teores de fósforo nos solos sob manejo conservacionista foram superiores aos obtidos nos solos sob cultivo convencional. Já Negassa e Leinweber (2009), em revisão referente ao uso do fracionamento de Hedley para avaliar agroecossistemas com diferentes usos e manejos do solo, concluíram que todas as frações inorgânicas e orgânicas de P podem atuar como fonte ou dreno do nutriente disponível, dependendo do manejo e da adubação.

2.10 Fracionamento do Fósforo

A compreensão dos fenômenos básicos da dinâmica do P no solo é importante para a tomada de decisão sobre a necessidade de adição e para a definição das doses e dos modos de aplicação de fertilizantes fosfatados (SANTOS et al., 2008a). A dinâmica do P no solo é bastante complexa e seu estudo muitas vezes exaustivo, mas o entendimento de como ocorrem os processos de troca envolvendo adsorção e dessorção se faz necessário para compreender o comportamento desse elemento nos diferentes solos (PAVINATO et al., 2009). Verma et al. (2005) afirmam que, se por um lado as inter-relações entre as várias formas de P no solo são complexas, por outro lado, informações sobre a dinâmica de diferentes frações de P podem aumentar a compreensão das fontes e drenos de P no solo e são essenciais para um programa de gestão de P eficiente. O conhecimento da natureza e distribuição das formas de P no solo pode fornecer informações importantes para o processo de avaliação da disponibilidade do fósforo (MACHADO et al., 1993). Diante disso, para que haja melhor entendimento dos condicionantes da disponibilidade de P, vários métodos têm sido desenvolvidos para compreender suas formas no solo e, com isso, estudar suas transformações (SANTOS et al., 2008b). Embora o ciclo do Pi domine historicamente a pesquisa de P, há uma crescente conscientização sobre a importância das formas orgânicas e microbianas de P na determinação das transformações de P nos ambientes terrestres (SIMS; SHARPLEY, 2005).

Informações sobre o Po do solo são essenciais para a compreensão dos ciclos biogeoquímicos e da ecologia do ecossistema, haja vista a variedade de mecanismos complexos para acessar o fósforo orgânico (TURNER et al., 2004). Estas características aumentaram o interesse científico em acessar Po para a produção de plantas, diminuindo assim a dependência de fertilizantes inorgânicos e aumentando a relevância do Po do solo, reduzindo a curto e médio prazo a necessidade de adições continuadas de P (HAYGARTH et al., 2013; GEORGE et al., 2018).

Apesar da importância do Po no solo, sua natureza química e dinâmica permanecem pouco compreendidas, que se deve, em parte, a limitações analíticas, porque não existem métodos diretos para quantificar ou especiar Po do solo (TURNER et al., 2005). As principais ferramentas analíticas para determinar Po são a espectroscopia de ^{31}P RMN, que é usado para identificar compostos de Po em diversas matrizes ambientais, juntamente com métodos de extração de solo mais tradicionais, tais como aqueles para medir o total Po e o método de extração sequencial (GEORGE et al., 2018).

O método de extração sequencial é amplamente utilizado em estudos sobre as diferentes frações de P. De acordo com Silva e van Raij (1999), para entender melhor a dinâmica do P em solos, é necessário conhecer as diferentes frações do elemento. Segundo os mesmos autores, uma abordagem para a compreensão da dinâmica do P é dividi-lo em frações, pelo uso de soluções de diferentes composições e capacidades de extração, dada a complexidade do comportamento deste nutriente no solo. Metodologias de extração sequencial de P presente no solo foram adotadas ao longo do tempo, visando quantificar os diversos compartimentos através de metodologias que envolvem a adoção destes extratores de acordo com o grau de força de ligação entre P e os componentes do solo (CONDRON; NEWMAN, 2011). Nos últimos 50 anos, uma ampla gama de técnicas de fracionamento de P foi desenvolvida e aplicada ao estudo das transformações de P no solo em uma variedade de ecossistemas naturais e gerenciados. Estes métodos de fracionamento, utilizando extrações alcalinas e ácidas sequenciais têm sido utilizados com moderado sucesso para avaliar o Po disponível nos solos (BLAKE et al., 2003).

De acordo com Gatiboni (2003), o primeiro método para a estimativa das formas de P no solo por diferentes extratores foi apresentada por Chang e Jackson (1957), presumindo que

a utilização de diferentes extratores poderiam extrair seletivamente as diferentes formas de P. Segundo o mesmo autor, a utilização destes extratores de maneira sequencial, do menor para o maior poder de extração, evitaria a extração simultânea de várias formas de P, o que ocorre se cada um deles fosse adicionado em separado em amostras do solo. Este esquema de fracionamento é utilizado apenas para determinação de formas inorgânicas de P (CONDRON; NEWMAN, 2011). Contudo, serviu de base para alguns dos esquemas de fracionamento subsequentes envolvendo fósforo orgânico do solo (TURNER et al., 2005). Alguns dos métodos de fracionamento de P desenvolvidos posteriormente foram propostos por Sommers et al. (1972) e Bowman e Cole (1978), além dos fracionamentos incluindo combinações de P inorgânico e orgânico (van ECK, 1982; RUTTENBERG, 1992, CHEN et al., 2002; TIESSSEN; MOIR, 2008) e combinações de P inorgânico, orgânico e microbiano (HEDLEY et al., 1982).

Entre estes métodos, um bastante empregado é o de Hedley et al. (1982), que se baseia na extração sequencial de formas lábeis, pouco lábeis e não-lábeis, por meio da qual as formas inorgânicas e orgânicas são separadas conforme sua disponibilidade às plantas (SILVA et al., 2003). Para Schmidt et al. (1997), a vantagem deste método é a obtenção de informações sobre a disponibilidade de P a curto e longo prazo, por meio dos valores das várias frações de P, de vários graus de disponibilidade para as plantas, podendo também ser empregado para acompanhar modificações nas formas de P, em decorrência de processos no solo (ARAUJO; SALCEDO, 1997). Nessa técnica são adicionados extratores de menor à maior força de extração, os quais removem P_i e P_o , das formas mais disponíveis às mais estáveis. Os extratores são Resina Trocadora de Ânions (P_{IRTA}), $NaHCO_3$ $0,5 \text{ mol l}^{-1}$ a pH 8,5 (P_{bic} e P_{obc}); $NaOH$ $0,1 \text{ mol l}^{-1}$ (P_{hid} e P_{ohid}); $NaOH$ $0,1 \text{ mol l}^{-1}$ + ultrasonificação (P_{son} e P_{oson}); HCl $1,0 \text{ mol l}^{-1}$ (P_{HCl}) e; digestão com $H_2SO_4 + H_2O_2$ (P_{dig} + P_{odig}) (GATIBONI, 2003).

Formas de P extraídas por resina e bicarbonato de sódio são consideradas as frações mais lábeis; em seguida, vêm as extraídas por hidróxido de sódio, que são frações moderadamente lábeis, incluindo P associado a óxidos de Al e Fe; depois, as extraídas por ácido, que estão ligadas à apatita e outros fosfatos de Ca menos reativos; finalmente, o P determinado por uma digestão peróxido/sulfúrica representa o fosfato mais recalcitrante, que não pôde ser extraído nas frações anteriores (HEDLEY et al., 1982; ARAUJO et al., 2004). Pavan e Chaves (1996), ao avaliarem as formas orgânicas e inorgânicas de P num Latossolo Roxo distrófico argiloso sob três densidades de plantio de cafeeiros, verificaram a seguinte ordem crescente de extração: P-lábil (5% do P-total) <P-pouco lábil (30% do P-total) <P-não lábil (65% do P-total), após 15 anos de cultivo. Santos et al. (2008b), ao utilizar o fracionamento de Hedley para quantificar frações inorgânicas e orgânicas de P em solo da região do Cerrado, em função de diferentes modos de aplicação de fontes de P com reatividade distinta, após três cultivos de milho, verificaram que o método utilizado foi eficiente na avaliação da dinâmica das formas de P no solo. Já Tokura et al. (2002) ao estudar as alterações das formas de P em decorrência de diferentes sistemas de manejo, concluíram que o método de extração sequencial de P foi eficiente na avaliação dos efeitos do sistema de manejo e do tempo de cultivo na dinâmica das transformações de P no solo.

Frente ao exposto, a metodologia de fracionamento de P tem sido importante na predição da quantidade de P no solo, bem como o seu comportamento, sem mencionar o potencial que a técnica apresenta, se associada aos extratores de rotina para melhor compreensão da dinâmica e disponibilidade deste nutriente para as plantas (REIS, 2012). Algumas vantagens do uso do fracionamento estão relacionadas ao fato de que estes usam apenas pequenas amostras de solo, são relativamente simples de executar e requerem apenas equipamentos básicos de laboratório (TURNER et al., 2005).

2.11 Uso da Geoestatística na Análise Espacial do Fósforo

Para o manejo sustentável do P nos solos, é necessário aprimorar as práticas de aplicação dos fertilizantes (PANTANO et al., 2016). Grande parte da aplicação dos fertilizantes fosfatados é realizada sem considerar a variabilidade espacial dentro de uma área de manejo, o que causa aumento no custo do processo produtivo, uma vez que áreas com pouca necessidade de P recebem as mesmas quantidades que as com deficiência (MARQUES JÚNIOR et al., 2008). No entanto, o conhecimento da variabilidade espacial do P no solo pode ser determinante para melhor administração no diagnóstico de áreas com deficiência desse elemento e para adoção quantitativa da adubação (LEÃO et al., 2007).

Todas as amostras retiradas de algum ponto no espaço ou no tempo devem ser consideradas como parte de uma função contínua e são pontos discretos desta função (VIEIRA et al., 2008). Por isso, de acordo com os mesmos autores, pode se dizer que todas as amostras são, de algum modo, relacionadas com seus vizinhos, mesmo que não se conheça exata e matematicamente qual é a expressão para este relacionamento. Nessa condição, pode-se dizer que amostras mais próximas são mais parecidas umas com as outras do que amostras separadas por grandes distâncias (VIEIRA, 2000).

Segundo Vieira et al. (2008), a geoestatística é a maneira mais correta e contém as ferramentas ideais para analisar dados com dependência espacial, ou seja, cujos vizinhos próximos são mais semelhantes entre si do que aqueles separados por distâncias maiores. Para Andriotti (2003), as vantagens reconhecidas da geoestatística sobre outras técnicas convencionais de predição são o estudo da variabilidade espacial (a análise de um variograma é a única técnica disponível para medir a variabilidade espacial de uma variável regionalizada), a suavização (quanto maior a variabilidade da amostra, menos as observações individuais representam sua vizinhança imediata e mais elas são suavizadas, com maior incerteza associada); o desagrupamento (ou efeito de anular as concentrações localizadas de observações); a determinação da anisotropia (os comportamentos da variabilidade nas diferentes direções são considerados); a precisão (a krigagem fornece valores precisos sobre as áreas ou pontos a serem avaliados); e a incerteza (estimativas obtidas por meio da krigagem associam a margem de erro que acompanha a estimativa).

O conhecimento da variabilidade das propriedades do solo e das culturas, no espaço e no tempo, é considerado, atualmente, o princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas, qualquer que seja sua escala (GREGO; VIEIRA, 2005). O manejo do solo propicia alterações na variabilidade natural do solo, principalmente nas camadas superficiais (CORÁ et al., 2004). Desse modo, a geoestatística, pela análise de semivariogramas, tem sido a técnica mais utilizada para a caracterização da variabilidade espacial (CARVALHO et al., 2004), pois se baseia em uma função aleatória contínua estacionária, a qual pode ser submetida a uma grande gama de hipóteses (SIQUEIRA et al., 2008).

O semivariograma é a grandeza mais apropriada para decidir se a dependência espacial existe ou não (VIEIRA et al., 2008). Dependência espacial existe quando a amostragem é efetuada em espaçamentos menores do que as manchas na área. Portanto, a análise dos dados resultará em um semivariograma que apresenta crescimento na semivariância até uma determinada distância, a partir da qual ele se estabiliza (VIEIRA, 2000). Desta maneira, a semivariância "depende" da distância.

A estrutura de um semivariograma é composta por quatro parâmetros: alcance, efeito pepita, contribuição e patamar. O efeito pepita (C_0) é o valor da semivariância para a distância zero e representa o componente da variação ao acaso; o patamar ($C_0 + C_1$) é o valor da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor constante, aproximadamente igual à variância dos dados; a variância a priori (C_1) é dada pela diferença entre o patamar e o efeito pepita; e o alcance (A) é a distância da origem até onde o patamar atinge valores

estáveis, expressando a distância além da qual as unidades de amostra não são correlacionadas (TRANGMAR et al., 1985).

A geoestatística tem um método de interpolação chamado krigagem, que usa a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima (VIEIRA, 2000). É o estimador adotado na maioria dos estudos sobre a variabilidade espacial do P (SAMPAIO et al., 2011). A krigagem é uma coleção de técnicas de regressão linear generalizada para minimizar uma estimativa da variância definida a partir de um modelo para uma covariância (DEUSTCH; JOURNAL, 1998). É uma média móvel ponderada, onde os pesos são variáveis de acordo com a variabilidade espacial expressa no semivariograma.

Cada vez mais, os pesquisadores têm presenciado a importância em estudar a variabilidade espacial dos atributos do solo (SILVA JÚNIOR et al., 2013). Desde as primeiras aplicações da geoestatística em solos nos anos 80, os estudiosos da ciência do solo já estão convencidos de que os solos possuem variabilidade natural, pelo seu material de origem, além da variabilidade encontrada no sentido vertical, e também no sentido horizontal (ZANÃO JÚNIOR et al., 2010; SILVA JÚNIOR et al., 2013).

A variabilidade de atributos do solo é uma preocupação antiga e, ainda hoje, diversos autores dedicam-se a pesquisar os efeitos dessa variação (SILVA et al., 2010). Entre os atributos estudados por pesquisadores da ciência do solo está o fósforo (P), pois, de acordo com Leão et al. (2007) o conhecimento da dinâmica do elemento, sua distribuição e seu aproveitamento encerram uma complexidade de fatores inerentes a cada local de amostragem o que leva a dificuldade de sua avaliação. Para os mesmos autores, um dos fatores que contribui para tal complexidade pode ser atribuída a variabilidade do solo.

Leão et al. (2007) ao avaliarem a variabilidade espacial do P disponível em um Neossolo Flúvico em três profundidades (0-20, 20-40 e 40-60 cm) verificaram que o índice de dependência espacial em relação ao patamar foi classificado como forte nas três profundidades estudadas, podendo esse resultado ter sido influenciado por propriedades intrínsecas do solo como mineralogia e textura. Os autores também verificaram que os alcances de dependência espacial para o P nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade foram menores quando comparados àqueles referentes à camada de 40-60 cm, demonstrando maior descontinuidade na distribuição espacial do fósforo nas camadas superficiais. De acordo com os autores, o manejo do solo alterou a dependência espacial do P na camada superficial de forma a aumentar a sua variabilidade espacial em relação à camada mais profunda do solo.

Em seu estudo, Souza et al. (2008), objetivando analisar a variabilidade espacial dos teores de P, K e da necessidade de calagem do solo sob pastagem amostrado de forma regionalizada e comparar com valores obtidos pelo método convencional de amostragem, verificaram que as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial, classificada como forte e moderada e, que, a análise geoestatística das variáveis, por amostragem regionalizada, permitiu mapear a variabilidade espacial na área, o que não é possível na amostragem convencional. Já, Zonta et al. (2014), ao avaliarem a variabilidade espacial dos atributos de fertilidade do solo em Latossolo Vermelho Amarelo em plantio direto para o algodoeiro em Cristalina-GO, verificaram que o P apresentou forte dependência espacial. Por outro lado, Motomiya et al. (2011) não encontraram dependência espacial para P, demonstrando que o grau de dependência espacial dos atributos do solo pode variar em função da área e do manejo aos quais é submetida.

Silva et al. (2010), ao estudarem a variabilidade espacial do P, estimando-a através de cokrigagem, tendo como co-variáveis as frações granulométricas do solo num Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, com textura argilosa, observaram correlação linear entre o teor de P no solo as frações granulométricas. Segundo os autores a correlação significativa entre P

com argila e areia indica que é plausível usar tais variáveis como auxiliar na determinação da distribuição espacial do P.

Em seu estudo Barbieri et al. (2013), avaliando a variabilidade espacial dos óxidos de ferro da fração argila e sua relação com atributos físicos e químicos do solo, em diferentes sistemas de colheita (sistema de colheita mecanizada e sem queima e sistema de colheita manual e com queima) de cana-de-açúcar na Região de Ribeirão Preto, SP, em Latossolo Vermelho, textura muito argilosa, na profundidade de 0,00-0,25 m, encontraram correlação negativa entre a matéria orgânica (MO) e o P adsorvido, em duas áreas estudadas, demonstrando a influência dos teores de MO na adsorção de P, haja vista que a MO pode competir com o íon fosfato pelos sítios de adsorção.

Os maiores teores de MO foram observados na área de cana crua, juntamente com os maiores valores de diâmetro médio do cristal (DMC) da goethita, indicando que as frações da MO (ácidos fúlvico e húmico), representadas pela alteração do grau de humificação, no ambiente de cana crua, dissolveram os minerais com menor DMC (menos cristalizados e com maior superfície específica), liberando o P adsorvido, deixando no sistema goethitas maiores.

Alvares et al. (2011), ao identificarem a variabilidade e dependência espacial de atributos químicos e físicos de solos da floresta de Capão Bonito, observaram que a distribuição espacial do P na camada de 0 a 30 cm foi semelhante à da matéria orgânica do solo. Abu e Malgwi (2011), ao determinarem o grau de variabilidade espacial e estrutura de variância das propriedades físicas e químicas do solo no estado de Kano, na Nigéria, observaram que o semivariograma cruzado entre MOS e P mostrou uma correlação positiva. Vieira et al. (2009), ao caracterizarem a variabilidade espacial dos atributos químicos em duas profundidades (0-0,2 e 0,2-0,4 m,) em um Latossolo Vermelho após a remoção de um cafezal cultivado por mais de 30 anos, verificaram que todos os atributos apresentaram dependência espacial, e, que, a análise integrada do mapa visual para as duas profundidades mostrou um grau de similaridade entre os mapas de matéria orgânica do solo e P.

Panday et al. (2019), avaliaram a variabilidade de algumas propriedades do solo (pH, matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, potássio, boro e zinco) de três tipos diferentes de uso da terra (agricultura, agrofloresta e pastagem) para mapear sua distribuição espacial. De acordo com os autores, os resultados mostraram uma diferença significativa no P disponível entre as áreas de agricultura, agrofloresta e pastagem. As terras agroflorestais apresentaram o maior P disponível em comparação às terras agrícolas e pastagens, o que pode estar relacionado com maior acúmulo de matéria orgânica em função da serapilheira na área de agrofloresta.

Niederberger et al. (2019), determinaram a distribuição de diferentes frações de P, abrangendo uma grande variedade das condições do solo (profundidades de 0 a 5 e 10 a 30 cm), na Alemanha, analisando as relações entre essas frações de P e propriedades comuns do solo (como pH, textura, e teor matéria orgânica do solo). Segundo os autores, como as formas orgânicas de P podem representar mais de 50% do total de P nos solos minerais, é possível assumir uma forte influência MOS na distribuição de P nestes solos. Os autores observaram que o P total e todas as frações de P aumentaram com o aumento do conteúdo de matéria orgânica no solo, e que houve uma forte correlação positiva entre o teor de MOS e o teor de Po total. Os autores também verificaram aumento nas frações inorgânicas de P com o aumento do conteúdo de MOS, e, relacionaram este resultado com a rápida rotação microbiana como fonte de P inorgânico lábil. Segundo os autores, as análises indicaram que a MOS é um forte preditor positivo de P lábil e moderadamente lábil e, em menor grau, também para o reservatório estável de P.

Negassa et al. (2019), ao investigarem a variabilidade espacial das propriedades do solo de uma turfa que foi usada para pastagens extensivas e intensivas, verificaram que a correlação entre MOS e P foi altamente significativa. Para os autores, uma vez que mais de 75% do total de P pode estar na forma de Po, mantendo e/ou melhorando o conteúdo de MOS

das turfeiras, não apenas sequestra carbono, mas também armazena P na forma de Po. As correlações positivas significativas entre MOS e P podem indicar que a principal fonte deste elemento foi a MO no solo de turfa estudado.

Liu et al. (2016), estudando a distribuição espacial de heterogeneidade do P total do solo na bacia hidrográfica de Yaoxiang, em uma área montanhosa do norte da China, verificaram que os teores de P total variaram em função da presença de matéria orgânica. Segundo os autores, a serapilheira, atuou como fonte eficaz de nutrientes do solo, melhorando a estrutura do solo e as propriedades físicas e químicas, resultando em altos conteúdos de P total. Segundo os autores, a decomposição da serapilheira foi benéfica e propícia o acúmulo de N e P no solo.

Willy et al. (2019), ao avaliarem a sustentabilidade do uso da terra agrícola, identificando o efeito da mudança do uso da terra na qualidade do solo, no Quênia, observaram que o P e a matéria orgânica tiveram uma alta correlação positiva. De acordo com os autores, a matéria orgânica do solo levou à melhoria da disponibilidade de P. Além disso, o P estava menos disponível em regiões com níveis mais altos de argila. Estes resultados permitem inferir que a textura e o teor de MO no solo possui grande influência na variabilidade espacial do P.

3. CAPÍTULO I

ESTRUTURA E EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA SOBRE FÓSFORO ORGÂNICO DO SOLO: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

3.1 RESUMO

A disponibilidade e mobilidade do fósforo (P) nos solos dependem de suas formas químicas. O P do solo é dividido em dois grandes grupos, fósforo inorgânico e fósforo orgânico. Nos solos tropicais, a forma orgânica de P pode constituir de 5 a 80 % do P total do solo, e, após a mineralização, constitui uma fonte de P para as plantas, principalmente em solos com baixos teores de P disponível. Estas características aumentaram o interesse científico em acessar P orgânico para a produção de plantas, elevando o número de publicações sobre P orgânico nas últimas duas décadas. O presente estudo trata de uma análise bibliométrica da produção científica mundial sobre fósforo (P) orgânico do solo, com base nos artigos publicados em periódicos indexados na base *Web of Science*. O estudo é baseado em artigos científicos, revisões de literatura e artigos de procedimento na área de ciência do solo, publicados entre 1998 e 2018. Os indicadores bibliométricos determinados foram: (a) número de publicações por ano; (b) número de citações por ano; (c) número de publicações por autores; (d) número de publicações por país e instituição; (e) principais periódicos e (f) artigos mais citados. Foram recuperados 947 artigos, publicados em 47 periódicos científicos. No geral, o número de publicações e citações aumentou linearmente em função dos anos, com o maior número de publicações em 2015 (73 artigos) e de citações em 2018 (2754 citações). No período considerado, foram encontrados 80 países publicando estudos sobre P orgânico do solo. Entre eles, os EUA foi o mais produtivo, com 207 artigos (21,85% do total), seguido por China (13,41%, N = 127) e Austrália (11,93 %, N = 113). Os periódicos *Geoderma*, *Communications in Soil Science and Plant Analysis* e *Plant and Soil* são os mais ativos nas publicações sobre P orgânico do solo. Os principais problemas debatidos estão relacionados à aplicação de fertilizantes fosfatados e seus efeitos na longevidade das reservas de fósforo; a fixação de P no solo; eutrofização de corpos hídricos e o fato do P ser um recurso finito e insubstituível. O P orgânico do solo representa um tema científico relevante, que deve ser considerado por governos e países em suas políticas científicas e tecnológicas.

Palavras-chave: Cientometria. Colaboração científica. Formas de fósforo. Indicadores bibliométricos.

3.2 ABSTRACT

The availability and mobility of phosphorus (P) in soils depends on their chemical forms. The soil P is divided into two major groups, inorganic phosphorus and organic phosphorus. In tropical soils, the organic form of P can constitute 5 to 80% of the total P of the soil, and, after mineralization, it becomes a P source for plants, mainly in soils with low levels of available P. These characteristics increased the scientific interest in accessing organic P for the production of plants, increasing the number of publications on organic P in the last two decades. The present study deals with a bibliometric analysis of the world scientific production on organic soil phosphorus (P) based on articles published in journals indexed in the Web of Science database. The study is based on scientific articles, literature reviews and procedural articles in the field of soil science, published between 1998 and 2018. The bibliometric indicators included: (a) number of publications per year; (b) number of citations per year; (c) number of publications by authors; (d) number of publications by country and institution; (e) main journals and (f) most cited articles. 947 articles were retrieved, published in 47 scientific journals. Overall, the number of publications and citations increased linearly over the years, with the largest number of publications in 2015 (73 articles) and citations in 2018 (2754 citations). In the period considered, 80 countries were found publishing studies on soil organic P. Among them, the USA was the most productive with 207 articles (21.85% of the total), followed by China (13.41%, N = 127) and Australia (11.93%, N = 113). The journals *Geoderma*, *Communications in Soil Science and Plant Analysis* and *Plant and Soil* are the most active in publications on soil organic P. The main problems discussed are related to the application of phosphate fertilizers and their effects on the longevity of phosphate reserves; the fixation of P in the soil; eutrophication of water bodies and the fact that P is a finite and irreplaceable resource. Organic P of the soil is a relevant scientific theme, which should be considered by governments and countries in their scientific and technological policies.

Keywords: Scientometry. Scientific collaboration. Phosphorus forms. Bibliometric indicators.

3.3 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é exigido pelas plantas em quantidades relativamente grandes (CADEMUN et al., 2018). Nas regiões tropicais um dos principais fatores limitantes para a produção vegetal é a disponibilidade do P nestes solos, que são altamente intemperizados, com característica de adsorção, o que limita a disponibilidade de P para a solução do solo (TEIXEIRA et al., 2016; ROCHA JUNIOR et al., 2018). Mesmo solos que recebem quantidades adequadas de P para manter a produção, há fraca recuperação do P de fertilizantes, o que resulta num acúmulo de P total no solo (RICHARDSON et al., 2009).

O P total compreende uma grande diversidade de espécies inorgânicas e orgânicas. O P inorgânico (Pi) pode ser dividido em P-mineral primário, precipitados secundários de Ferro, Alumínio e Cálcio amorfos e cristalinos e P-adsorvido, predominantemente a silicatos de argila 1:1 e oxi-hidróxidos de Fe e Al (PARFITT, 1978). Já as formas orgânicas de P (Po) engloba a biomassa microbiana do solo e compostos provenientes da decomposição da matéria orgânica (NASH et al., 2014). Pode constituir de 5 a 80% do P total do solo e, nos solos tropicais, é fonte de P às plantas (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2003).

Apesar das diferentes formas de P no solo, apenas uma pequena proporção está imediatamente disponível às plantas (RICHARDSON et al., 2009), sendo necessária a adoção de fertilizantes em larga escala (ALEIXO et al., 2017). Estima-se que apenas 5% a 25% do P solúvel adicionado ao solo, como adubo, seja aproveitado pela cultura e que 95% a 75% seja fixado (FALCÃO; SILVA, 2004). Dessa forma, preocupações em torno da longevidade e localização das reservas de fosfato mineral, levantam o debate sobre a sustentabilidade do P a longo prazo (CORDELL et al., 2009), já que se trata de um recurso finito e insubstituível.

Em solos com baixos teores de P disponível, o Po torna-se relevante (GATIBONI et al., 2007). Em geral, formas orgânicas de P têm uma menor afinidade com a fase sólida do solo, sendo mais móveis no solo e menos suscetíveis às reações de adsorção (CARNEIRO et al., 2011). Portanto, constitui-se em uma importante fonte desse nutriente às plantas por meio de sua mineralização (DUDA et al., 2006). Estas características aumentaram o interesse científico em acessar Po para produção de plantas, visando diminuir a dependência de fertilizantes inorgânicos, reduzindo a curto e médio prazo a necessidade de adições continuadas de P (HAYGARTH et al., 2013; GEORGE et al., 2018).

Assim, surgiram plataformas de intercâmbio de ideias e investigação sobre Po, por exemplo, a Plataforma Europeia de Fósforo Sustentável, a Rede de Coordenação de Pesquisa de Fósforo Sustentável dos EUA, “Pesquisa em Fósforo” de Leibniz Science Campus Rostock (KRUZE et al., 2015), Sociedade Norte-Americana pela Sustentabilidade do Fosforo (ROSEMARIN; EKANE 2015) e o Fórum do Fósforo do Solo (GEORGE et al., 2018). Resultando em um aumento da cooperação internacional sobre este tema (MENEZES-BLACKBURN et al., 2018), elevando o número de publicações sobre Po nas últimas duas décadas (GEORGE et al., 2018). No entanto, grande parte da pesquisa ainda está fragmentada e desconectada (MENEZES-BLACKBURN et al., 2018). Segundo George et al. (2018), é preciso integrar as informações para um maior entendimento das pesquisas no ambiente natural e gerenciado. Desta forma, a comunidade de Po poderá fazer um balanço de onde se está indo e o que é necessário para o futuro da pesquisa sobre o tema (HAYGARTH et al., 2018a).

A bibliometria pode ser uma ferramenta para tal fim, pois permite uma visão abrangente da ciência, explicando os padrões de organização do seu conhecimento e fornecendo perspectivas à comunidade científica (ARVANITIS; CHATELIN, 1994), possibilitando compreender o desenvolvimento da pesquisa científica, bem como indicar caminhos para o seu avanço ou desenvolvimento (ARAÚJO; ALVARENGA, 2011). Permite realizar “estados da arte” de áreas do conhecimento, mapear campos de pesquisa, produzir

indicadores de produção científica e analisar padrões de comunicação científica (SILVA et al., 2011), identificando quem produz (autores/gênero/grupos de pesquisa), quando (período de realização do estudo), como (metodologia) e onde (região/instituição). Ou seja, situa um país em relação ao mundo, uma instituição em relação a um país, e cientistas em relação às comunidades científicas, fornecendo um parâmetro tanto de que é produzido quanto das lacunas existentes (SOARES et al., 2016; FIRME et al., 2017), com isso, tem sido objeto de interesse de governos e países para orientar suas políticas científicas e tecnológicas (SILVA et al., 2011).

Diante do exposto, o presente estudo trata de uma análise bibliométrica da produção científica mundial sobre Po do solo, com base nos artigos publicados em periódicos indexados na base *Web of Science*, no período de 1998 e 2018, tendo como principais objetivos avaliar a evolução e a contribuição dos países para pesquisa científica sobre fósforo orgânico do solo; identificar os pesquisadores, grupos de pesquisa e instituições mais relevantes, bem com sua cooperação para o avanço do tema, apresentar um panorama das pesquisas realizadas ao longo do tempo e contribuir com novos estudos sobre o tema em questão.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Obtenção dos dados

A coleta de dados foi realizada em agosto e setembro de 2019, tendo como única fonte de dados a coleção principal da plataforma *Web of Science*, desenvolvida pela Thomson Reuters - Institute for Science Information (ISI).

Para a realização da análise bibliométrica na plataforma foi utilizado o seguinte comando de busca: ("organic phosphorus" OR "phosphorus form*" OR "phosphorus fraction*"). O uso do símbolo "*" possibilita a busca de outras palavras antes ou entre a expressão, contemplando assim expressões similares (DAL PIZZOL et al., 2015). Consideraram-se para avaliação neste estudo somente artigos científicos publicados em periódicos; revisões de literatura e artigos de procedimento, na área de ciência do solo, totalizando 947 documentos.

3.4.2 Tratamento dos dados e avaliações

Os dados resultantes da pesquisa bibliométrica foram exportados para o software Excel onde passaram por filtragem, padronização e análise. Os dados bibliométricos determinados com base nas publicações recuperadas foram: a) número de publicações por ano; b) número de citações por ano; c) número de publicações por autores; d) número de publicações por país e instituição; e) principais periódicos e f) artigos mais citados. Foram considerados apenas os artigos publicados durante o período de 1998 e 2018.

Com base nas publicações recuperadas, foram construídos mapas bibliométricos usando o software VOSviewer (disponível em www.vosviewer.com), desenvolvido especificamente para visualização dos dados através de mapas científicos (van ECK; WALTMAN, 2010). Foram produzidos mapas de palavras-chave mais utilizadas e mapas de co-autoria. Estes mapas são uma representação bidimensional de um campo, em que termos fortemente relacionados estão localizados próximos uns dos outros e termos menos fortemente relacionados estão mais distantes um do outro (NARDI et al., 2016). Portanto, termos que frequentemente co-ocorrem nas mesmas publicações estão localizados próximos uns dos outros no mapa e termos menos fortemente relacionados (baixa co-ocorrência) estão localizados mais longe um do outro. Cada termo é representado por um círculo, onde seu diâmetro e o tamanho de seu rótulo indicam o número de publicações que possuem o termo correspondente (NARDI et al., 2016). Neste estudo, apenas termos ocorrendo pelo menos 10 vezes foram extraídos das publicações recuperadas.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Evolução temporal da publicação de artigos

Foram recuperados um total de 947 publicações científicas ao longo de 21 anos, sendo 96,93% constituído de artigos científicos publicados em periódicos. Na Figura 1 está representado o número de trabalhos publicados anualmente no período de 1998 a 2018 e indexados na plataforma *Web of Science*.

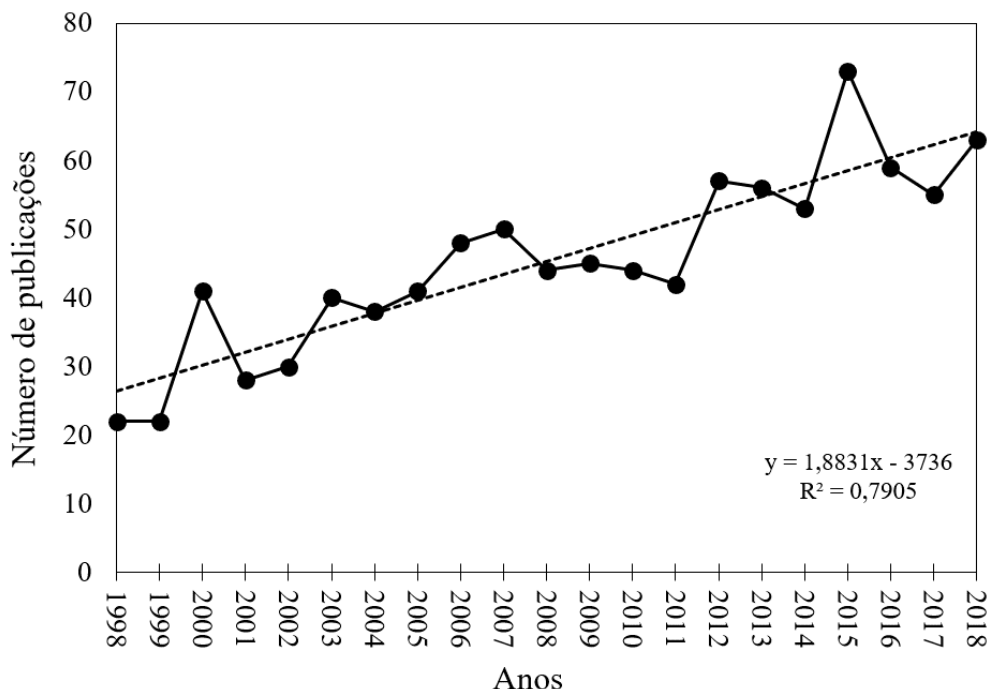


Figura 1. Evolução temporal da publicação de artigos científicos sobre fósforo orgânico do solo no período de 1998 a 2018 a nível mundial.

Analisando a evolução temporal das publicações verifica-se que, de maneira geral, o número de artigos publicados sobre Po aumentou de forma linear, variando entre 22 artigos publicados (2,47% do total) nos anos 1998 e 1999 e 73 artigos (6,19% do total) (ano 2015), com uma queda no número de publicações nos anos de 2016 e 2017, com 59 (6,64%) e 55 (6,19%) artigos, respectivamente, e, um novo aumento em 2018, somando 63 artigos (Figura 1). Esta tendência de aumento no número de publicações ao longo do tempo pode ser relacionada ao encurtamento dos prazos de periodicidade das revistas, dessa forma, elevando as taxas anuais de crescimento no número de publicações (VARGAS; VANZ, 2014). Analisando o crescimento da ciência globalmente, Bornmann e Mutz (2015), verificaram que o volume total de publicações cobertas pela *Web of Science* entre 1980 e 2012 dobrou a cada 24 anos. No presente estudo, o número de publicações mais do que triplicou dentro do período de 21 anos, apresentando boa evolução nas publicações sobre Po do solo.

O maior número de publicações no ano de 2015 pode estar associado ao fato de que nesse mesmo ano, na Revista “*Geoderma*”, foi publicada uma edição especial contendo quinze artigos com enfoque na ciclagem de Po em solos agrícolas, fornecendo uma visão interdisciplinar sobre os recentes desenvolvimentos na ciclagem de Po na agricultura e no meio ambiente (TURNER et al., 2015). A edição foi denominada “*Developments in soil*

organic phosphorus cycling in natural and agricultural ecosystems. Além disso, em 2018, a revista “Plant and Soil” publicou uma edição especial sobre Po, denominada “*Organic Phosphorus: Potential Solutions for Phosphorus Security*”. Segundo Haygarth et al. (2018b), a edição apresenta uma coleção de 21 artigos gerados a partir da Oficina de Fósforo Orgânico, que ocorreu em 2016, na Inglaterra. Portanto, explica o crescimento no número de publicações em 2018.

3.5.2 Evolução temporal do número de citações

Em relação a evolução no número de citações por ano, assim como verificado para número de publicações, houve um crescimento linear (Figura 2).

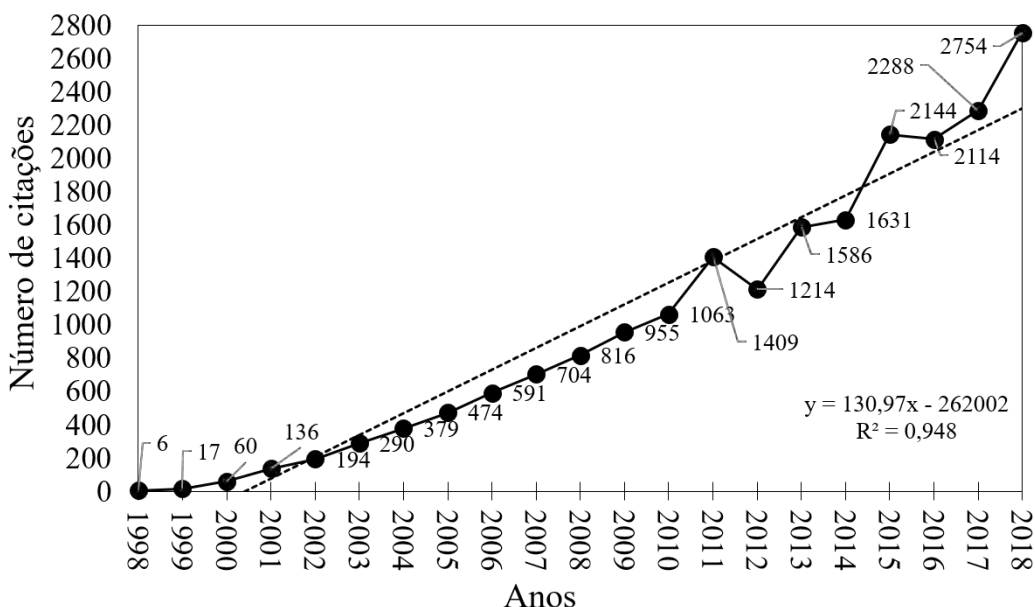


Figura 2. Evolução temporal do número de citações de artigos sobre fósforo orgânico do solo no período de 1998 a 2018 a nível mundial.

Os valores situaram-se entre 6 (1998) e 2754 (2018) citações, com destaque para os anos de 2010 em diante, onde em todos, o número de citações ultrapassaram 1000. Cabe ressaltar que houve um padrão de semelhança na evolução dos artigos publicados (Figura 1) e citados (Figura 2), principalmente a partir do ano de 2010, demonstrando que há uma estreita relação entre estes dois indicadores bibliométricos (LIAO; HUANG, 2014; GAO; GUO, 2014; NAVARRETE; ASIO, 2014).

3.5.3 Número de artigos científicos por país

O número de artigos científicos sobre Po por país estão apresentados na tabela 1. Foram encontrados 80 países com pelo menos uma publicação relacionada ao estudo do Po do solo. Entre eles, os Estados Unidos foi o mais produtivo, com 207 artigos, representando 21,85% do total de artigos publicados (n = 947). Nos EUA, o P foi designado em 2011 como um elemento de importância crucial para a segurança do país (DRURY, 2013), o que, em partes, pode explicar a alta atividade do país na pesquisa sobre P orgânico. Em seguida aparece a China, com 127 artigos publicados (13,41%) e Austrália, com 113 artigos (11,93%) (Tabela 1).

Tabela 1. Número de artigos científicos sobre fósforo orgânico do solo recuperados no *Web of Science* por país, no período de 1998 a 2018.

País	Nº de Artigos	%	País	Nº de Artigos	%
EUA	207	21,85	Quênia	17	1,79
China	127	13,41	Suécia	17	1,79
Austrália	113	11,93	Dinamarca	14	1,47
Brasil	96	10,13	Nigéria	14	1,47
Alemanha	96	10,13	Escócia	13	1,37
Canadá	72	7,60	Colômbia	12	1,26
Nova Zelândia	59	6,23	Holanda	10	1,05
Suíça	55	5,80	Paquistão	9	0,95
Inglaterra	48	5,06	Bélgica	8	0,84
Japão	36	3,80	Rep. Checa	8	0,84
França	34	3,59	Irlanda	8	0,84
Índia	28	2,95	Coréia do sul	8	0,84
Panamá	28	2,95	País de Gales	7	0,73
Irã	23	2,42	Etiópia	6	0,63
Espanha	22	2,32	Grécia	6	0,63
Argentina	21	2,21	México	6	0,63
Chile	20	2,11	Noruega	6	0,63
Rússia	18	1,90	Tailândia	6	0,63
Itália	17	1,79	Demais	92	9,71

%; Porcentagem do total de artigos recuperados (n = 947).

Entre os três países mais produtivos, verificaram-se índices H de 40, 22 e 36 para EUA, China e Austrália, respectivamente. O cálculo do índice H é feito com base no ordenamento decrescente do número de citações de cada trabalho do autor (ou grupo de pesquisa, revista, instituição), definindo-se como índice-h o ponto em que o número de citações corresponde ao número de ordem, ou seja, um pesquisador que tem 50 artigos publicados, dentre os quais 22 receberam 22 ou mais citações, terá índice-h = 22 (BARRETO et al., 2015). Portanto, os principais países listados não foram apenas os mais produtivos. Foram, também, considerados mais relevantes pela comunidade científica que estuda o solo.

3.5.4 Instituições mais produtivas

Na Tabela 2 estão sumarizadas as vinte instituições mais produtivas durante o período de 1998 a 2018. A “Chinese Academy of Sciences” foi a mais produtiva, com 73 artigos, representando 7,70% do total de publicação recuperadas, com índice H de 18. Logo em seguida se encontra a “United States Department of Agriculture”, com 60 publicações, que representa 6,33% do total de artigos, com H de 23. Ou seja, apesar de ter publicado menos artigos, a instituição americana obteve um maior índice H em comparação a instituição chinesa, evidenciando uma maior relevância por parte dos artigos publicados pela USDA.

A “ETH Zurich” e “University of Adelaide” ficaram na terceira e quartas posições, respectivamente, com 45 artigos para a instituição suíça, representando 4,75% do total de publicações e índice H de 20. Já a instituição australiana, somou 43 artigos publicados, o que representou 4,54% do total de artigos recuperados, com um índice H de 22.

Tabela 2. Vinte instituições mais produtivas em termo de publicações sobre fósforo orgânico do solo durante o período de 1998 a 2018.

Instituição	NA	%	Índice H
Chinese Academy of Sciences	73	7,70	18
United States Department of Agriculture	60	6,33	23
ETH Zurich	45	4,75	20
University of Adelaide	43	4,54	22
University of Chinese Academy of Sciences	36	3,80	11
Lincoln University	35	3,69	16
Agriculture AgriFood Canada	32	3,37	16
CSIRO	32	3,37	19
State University System of Florida	32	3,37	15
University of Bayreuth	31	3,27	22
University of Florida	31	3,27	15
Smithsonian Institution	29	3,06	15
Smithsonian Tropical Research Institute	28	2,95	15
Universidade Federal de Santa Maria	28	2,95	13
Institut National de la Recherche Agronomique	23	2,42	13
University of Gottingen	18	1,90	11
Helmholtz Association	17	1,79	11
Institute of Soil Science	17	1,79	8
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	16	1,69	8
Institut de Recherche Pourle Developpement	16	1,69	10

CSIRO: Commonwealth Scientific Industrial Research Organisation; NA: Número de artigos publicados; %: Porcentagem do total de artigos (n = 947).

Cabe ressaltar que apesar do Brasil ser o quarto país mais produtivos (tabela 1), aparece somente na 14^o posição das instituições mais produtivas, com a “Universidade Federal de Santa Maria” apresentando 28 publicações, representando 2,95% do total de publicações e um índice H de 13, além da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, que se encontra na 19^a posição, com 16 artigos, que representa 1,69% do total, com índice H = 8.

3.5.5 Pesquisadores Mais Produtivos

Na Tabela 3 estão elencados os pesquisadores mais produtivos em termo de publicações sobre Pono período de 1998 a 2018. Cabe ressaltar que em sua grande maioria, os pesquisadores mais relevantes em termos de produção pertencem ao *staff* das instituições mais produtivas (Tabela 2).

Tabela 3. Vinte pesquisadores mais produtivos em termo de publicações sobre fósforo orgânico do solo durante o período de 1998 a 2018.

Autores	Instituição	Artigos (N ^o)	%
Condron, L.M.	Lincoln University	38	4,01
Turner, B.L.	Smithsonian Tropical Research Institute	37	3,90
Frossard, E.	ETH Zürich	34	3,59
Bünemann, E.K.	ETH Zürich	25	2,64

Continua...

Continuação da Tabela 3.

Autores	Instituição	Artigos (N°)	%
Oberson, A.	ETH Zürich	22	2,32
Smernik, R.J.	University of Adelaide	21	2,21
Marschner, P.	University of Adelaide	20	2,11
He, Z.Q.	USDA	19	2,00
Cade-Menun, B.J.	Agriculture and Agri-Food Canada	16	1,69
Haygarth, P.M.	Lancaster University	15	1,58
Mcdowell, R.W.	AgResearch, Invermay Agricultural Centre	15	1,58
Richardson, A.E.	CSIRO	15	1,58
Zech, W.	University Bayreuth	14	1,47
Chen, C.R.	Griffith University	13	1,37
Gatiboni, L.C.	Universidade do Estado de Santa Catarina	13	1,37
Spohn, M.	University of Bayreuth	13	1,37
Tiecher, T.	Univ. Federal do Rio Grande do Sul	13	1,37
Brunetto, G.	Universidade Federal de Santa Maria	12	1,26
Reddy, K.R.	University of Florida	12	1,26
Amelung, W.	University of Bonn	11	1,16

%; Porcentagem do total de artigos recuperados (N = 947).

O pesquisador com maior número de artigos publicados e maior relevância (maior índice H) foi Condron, L.M., com 38 publicações, que representa 4,01% do total de artigos (índice H de 21). Em seguida aparece Turner, B.L., com 37 publicações (3,90% e índice H de 21). Haygarth et al. (2018a) cita estes pesquisadores como líderes na pesquisa sobre Po do solo. Seguidamente aparecem Frossard, E., com 34 publicações (3,59% e índice H de 20), Bünemann, E. K., com 25 publicações (2,64% e índice H de 13) e Oberson, A., com 22 artigos publicados, representando 2,32% do total recuperado e índice H de 14. Os três últimos pesquisadores citados são profissionais pertencentes a “ETH Zürich”, uma das instituições mais produtivas (tabela 2). A “University of Adelaide” tem dois representantes entre os vinte cientistas mais produtivos, são eles Smernik, R. J., com 21 publicações (2,21%) e Marschner, P., com 20 artigos publicados (2,11%), ficando nas 6ª e 7ª posições, respectivamente (tabela 3).

Vale destacar a USDA, que apesar de ser a 2ª instituição mais produtiva em termos de número de publicações, apareceu somente na 8ª posição, com o cientista He, Z. Q., com 19 (1,69%) artigos publicados. Este resultado indica que não há uma dominância de poucos pesquisadores, e sim uma distribuição uniforme entre os pesquisadores na instituição.

Também vale ressaltar o Brasil, com três cientistas entre os mais produtivos, sendo estes: Brunetto, G., Gatiboni, L. C. e Tiecher, T. (Tabela 3), pertencentes ao *staff* de três instituições, que são Universidade Federal de Santa Maria, Universidade do Estado de Santa Catarina e Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

3.5.6 Principais periódicos científicos

Os artigos recuperados foram publicados em 47 periódicos, cujos mais utilizados como fonte de divulgação científica (N = 15) pelos autores estão sumarizadas na Tabela 4. Dos 947 artigos analisados, 783 (82,68%) foram publicados nos 15 periódicos mais relevantes. Para Haunschild et al. (2016), o número de artigos publicados em um periódico específico pode ser visto como uma medida da importância ou “peso” desse periódico para um tópico ou campo de pesquisa específico. Segundo os mesmos autores, é interessante

descobrir quais periódicos estão dominando quantitativamente como meio de publicação para pesquisadores ativos num determinado campo da pesquisa.

Tabela 4. Quinze principais periódicos científicos onde estão publicados os artigos sobre fósforo orgânico do solo no período de 1998 a 2018.

Periódicos	FI	NA	%	H
Geoderma	3,74	103	10,87	25
Commun. Soil Sci. Plant Anal.	0,54	94	9,92	17
Plant and Soil	3,306	94	9,92	31
Soil Biology Biochemistry	4,926	76	8,02	33
Soil Science Society of America Journal	1,92	70	7,39	32
Biology and Fertility of Soils	3,808	68	7,18	25
Journal of Plant Nutrition and Soil Science	2,163	51	5,38	17
Revista Brasileira de Ciência do Solo	0,799	46	4,85	10
Nutrient Cycling in Agroecosystems	2,105	42	4,43	18
Soil Science	1,387	41	4,32	18
European Journal of Soil Science	2,644	23	2,42	17
Canadian Journal of Soil Science	1,085	21	2,21	9
Journal of Soils and Sediments	2,627	20	2,11	9
Journal of Soil Science and Plant Nutrition	2,116	17	1,79	6
Soil Use and Management	1,336	17	1,79	9

FI: Fator de Impacto do periódico; NA: Número de artigos publicados; %: Porcentagem do total de artigos (N = 947); H: Índice H.

Os periódicos mais importantes são “Geoderma”, “Communications in Soil Science and Plant Analysis”, “Plant and Soil”, “Soil Biology Biochemistry”, “Soil Science Society of America Journal”, “Biology and Fertility Of Soils” e “Journal of Plant Nutrition and Soil Science”, com todos estes publicando pelo menos 50 artigos no período de 1998-2018 (Tabela 4). Além de serem revistas de grande relevância no âmbito global, a quantidade de artigos publicados na “Geoderma” e “Plant and Soil” podem estar relacionados às edições especiais sobre fósforo orgânico publicadas por estes periódicos, como discutido na Figura 1.

Apesar dos periódicos “Geoderma” e “Communications in Soil Science and Plant Analysis” serem os melhores posicionados, sendo 1º e 2º colocados, respectivamente, os periódicos “Plant and Soil” (3º), “Soil Biology Biochemistry” (4º) e “Soil Science Society of America Journal” (5º) apresentaram o maior índice H, com 31, 33 e 32, respectivamente. Provavelmente, estes dados estejam relacionados ao fator de impacto destes periódicos, que figuram entre os mais altos, com 3,306 para “Plant and Soil”, 4,926 para “Soil Biology Biochemistry” e 3,808 para “Biology and Fertility of Soils”. Ou seja, estes periódicos são os mais procurados pelos cientistas que publicam artigos de qualidade mais elevada, e, conseqüentemente, somam o maior número de citações.

3.5.7 Artigos mais citados

Todos os 15 artigos mais citados entre 1998 e 2018 foram publicados em periódicos que figuram entre os mais relevantes (Tabela 4). Merece destaque o periódico “Plant and Soil”, que publicou sete dos artigos mais citados, que representa 46,66% do total de trabalhos (Tabela 5).

Tabela 5. Quinze artigos científicos mais citados sobre fósforo orgânico do solo no período de 1998 a 2018.

Título do Artigo	Ano	Periódico	MCA
1. Control on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review	2000	Soil Science	59,45
2. Phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectral assignments of phosphorus compounds in soil NaOH-EDTA extracts	2003	SSSAJ	17,35
3. Phosphate acquisition	2005	Plant Soil	17,40
4. Genetics of phosphate solubilization and its potential applications for improving plant growth-promoting bacteria	2006	Plant Soil	16,07
5. Forms of soil phosphorus in selected hydrologic units of the Florida everglades	2008	SSSAJ	14,18
6. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review	2009	JPNSS	7,05
7. Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources	1998	Plant Soil	6,82
8. Phosphorus transformations in a Oxisol under contrasting land-use systems: The role of the soil microbial biomass	2001	Plant Soil	16,33
9. Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems	2011	Plant Soil	7,58
10. Characterisation of water-extractable soil organic phosphorus by phosphatase hydrolysis	2002	Soil Biol. Biochem.	7,72
11. Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (<i>Lolium perenne</i> L.) and radiata pine (<i>Pinus radiata</i> D. Don.)	2002	Soil Biol. Biochem.	7,50
12. Components of organic phosphorus in soil extracts that are hydrolysed by phytase and acid phosphatase	2000	Biol. Fertil. Soils	6,45
13. Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil	2000	Plant Soil	6,40
14. Root traits as tools for creating phosphorus efficient crop varieties	2004	Plant Soil	7,94
15. Organic phosphorus composition and potential bioavailability in semi-arid arable soils of the western United States	2003	SSSAJ	7,18

Ano: Ano de publicação do artigo; MCA: Média de citação por ano.

A “Soil Science Society of America Journal” aparece em seguida, com três trabalhos entre mais citados. Em seguida, aparece “Soil Biology Biochemistry”, com dois artigos. Estas três revistas aparecem na 3^a, 4^a e 5^a posições, respectivamente, em relação aos periódicos mais relevantes para pesquisa sobre Po do solo (Tabela 4), com os maiores índices H entre todos os periódicos, além de apresentarem fatores de impacto (FI) entre os mais elevados.

Os principais problemas debatidos estão relacionados à elevada aplicação de fertilizantes fosfatados em áreas agrícolas e seus efeitos na longevidade das reservas de

fosfato; a fixação de P (adsorção e precipitação) no solo, favorecendo seu acúmulo em formas indisponíveis às plantas; a eutrofização de corpos hídricos, devido ao carreamento do P (erosão, lixiviação, escoamento) e o fato do P ser um recurso finito e insubstituível. Ou seja, apresenta caráter multidisciplinar, perpassando por fatores geopolíticos, socioeconômicos, e, principalmente, ambientais.

O artigo mais citado é uma revisão publicada na revista “Soil Science” no ano de 2000, intitulada “Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review” que conta com um total de 1189 citações e uma média de 59,45 citações por ano (Tabela 5). O trabalho compara os resultados entre as investigações de laboratório e de campo e as diferenças entre as dinâmicas de carbono orgânico dissolvido, nitrogênio e fósforo.

Em seguida, aparece o artigo “Phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectral assignments of phosphorus compounds in soil NaOH-EDTA extracts”, publicado em 2003, acumulando 295 citações e uma média de 17,35 citações por ano. Na 3ª posição encontra-se a revisão “Phosphate acquisition”, que, segundo os autores, descreve fatores moleculares, bioquímicos e fisiológicos associados à aquisição de fosfato de fontes inorgânicas e orgânicas de fósforo no solo pelas plantas. O trabalho foi publicado na “Plant and Soil” e tem 261 citações, com uma média de 17,40 citações por ano.

Os demais artigos e suas respectivas médias de citações por ano podem ser consultados na Tabela 5. Estes trabalhos apresentaram achados relevantes que serviram de base para as pesquisas e publicações que viriam a seguir. Portanto, os artigos elencados trazem informações importantes para compreender a dinâmica do P, tanto em ambientes naturais como em áreas agrícolas, sendo todos publicados em revista conceituadas globalmente, o que justifica sua relevância para a comunidade científica de P do solo. Segundo George et al. (2018), a pesquisa de P tem um papel crítico na abordagem de importantes desafios globais e há contribuições importantes para entender os ciclos biogeoquímicos, a dinâmica e a função dos ecossistemas naturais e o manejo dos sistemas agrícolas. Para os mesmos autores, a mudança de pensamento dependerá da comunicação do P para a sociedade, colocando essa importante área de pesquisa na agenda dos formuladores de políticas e órgãos financiadores em escala global.

3.5.8 Mapa de cluster de palavras-chave

No mapa de palavras-chaves mais utilizadas (Figura 3), observa-se que os termos estão agrupados em cinco grupos (azul, vermelho, verde claro, verde escuro e lilás). O cluster vermelho (parte inferior direita do mapa) agrupou 34 termos, dos quais se destacaram as palavras-chave “dynamics” (dinâmica), “availability” (disponibilidade) e “phosphate” (fosfato). Outros termos importantes agrupados no cluster vermelho foram “transformations” (transformações), “cultivation” (cultivo) e “phosphorus fractionation” (fracionamento do fósforo). Este agrupamento permite afirmar que o tipo de cultivo possui grande influência na dinâmica das transformações de P no solo, e, conseqüentemente, na disponibilidade do nutriente às plantas.

No cluster verde escuro (porção inferior esquerda) se agruparam 22 termos (Figura 3), sendo “phosphorus” (fósforo), “nitrogen” (nitrogênio), “phosphorus fractions” (frações de fósforo), “microbial biomass” (biomassa microbiana) e “manure” (adubo) as palavras-chave mais relevantes. Neste agrupamento também se destacaram termos como “management” (manejo), “fertilizer” (fertilizante), “tillage” (cultivo) e “land use” (uso do solo), permitindo afirmar que o uso do solo, aliado ao manejo da adubação e tipo de plantio podem influenciar na dinâmica das frações de P, inclusive do P microbiano, que representa uma importante fonte de P, principalmente por sua rápida dinâmica. Segundo Yevdokimov et al. (2016), o ciclo de P no solo é controlado principalmente pela atividade microbiana. O resultado observado no

cluster verde escuro confirmam os verificados no cluster vermelho em relação a influência do manejo do solo nas frações de P. Apesar de terem formado clusters distintos, o agrupamento vermelho e o verde escuro se apresentaram próximos no mapa, portanto, apresentam similaridades significativas entre si.

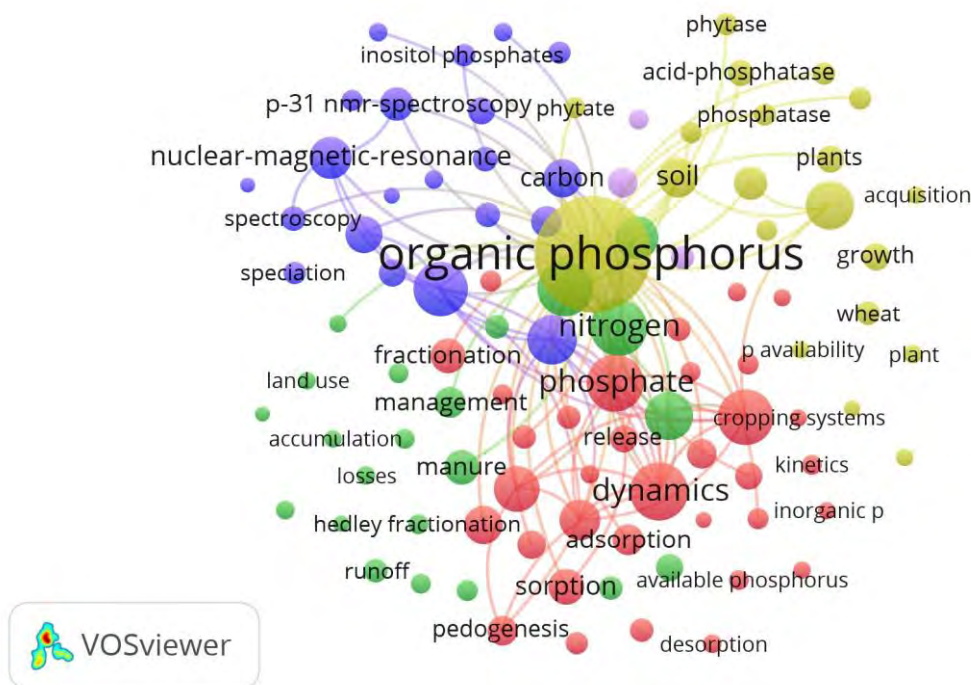


Figura 3. Mapa de palavras-chave mais utilizadas em artigos sobre fósforo orgânico do solo, no período 1998-2018. Cores diferentes representam os termos pertencentes a diferentes clusters. O tamanho do termo é baseado no número de ocorrências. As linhas de conexão indicam os 100 links de co-ocorrência mais fortes entre os termos.

No cluster azul (porção superior esquerda do mapa) formou-se um agrupamento de 21 termos, relacionados principalmente à relação entre matéria orgânica do solo e a dinâmica do Po, com os termos “carbon” (carbono) e “organic matter” (matéria orgânica) se destacando. No mesmo cluster encontram-se termos ligados a métodos de especiação do P orgânico, em que os principais termos foram “forms” (formas), “fractions”, (frações) “extraction” (extração) e “nuclear magnetic resonance” (ressonância magnética nuclear) (Figura 3). Segundo Cade-Menun (2005), a espectroscopia de ressonância magnética nuclear (^{31}P NMR) é o método estabelecido para quantificar a composição geral de Po do solo e sedimentos; o que pode explicar o elevado número de palavras-chave ligadas a esse método.

O cluster verde claro (20 termos), localizado na porção superior direita da figura é representado principalmente pelos termos “organic phosphorus” (fósforo orgânico), “rhizosphere” (rizosfera), “soil” (solo) e “phosphatase activity” (atividade da fosfatase), se mostrando fortemente relacionados entre si. Este agrupamento deixa claro a importância da atividade das enzimas fosfatases na disponibilidade de P, uma vez que podem mediar a clivagem de P inorgânico a partir do P orgânico (HINSINGER et al, 2015), principalmente em solos com baixa disponibilidade de P inorgânico.

Por fim, o cluster lilás apresentou três termos, sendo estes “mineralization” (mineralização), “decomposition” (decomposição) e “forest” (floresta) (Figura 3). Este agrupamento confirma a importância do Po para nutrição de plantas em solos florestais. De

acordo com Achat et al. (2009) em solos de florestas, as formas orgânicas de P podem constituir de 50 a 80% do total de P. Porém, a biodisponibilidade dependerá da decomposição do material vegetal presente no solo, e conseqüentemente, da mineralização do P orgânico nesses ecossistemas.

3.5.9 Mapa de cluster de co-autoria

Para o mapa de co-autoria, os termos apresentados foram agrupados em seis clusters. De maneira geral, observou-se que a publicação de artigos em conjunto tende a ocorrer com autores de instituições ou regiões semelhantes ou próximas geograficamente. O cluster vermelho (porção inferior central da figura) agrupou 15 pesquisadores, com destaque para Spohn, Marie; Frossard, Emmanuel e Bol, Roland (Figura 4). No cluster verde (porção superior esquerda), foram agrupados 13 pesquisadores, sendo Turner, Benjamin L.; Condrón, Leo M.; George, Timothy S. e Haygarth, Philip M os que figuram como maiores colaboradores científicos entre si neste agrupamento.

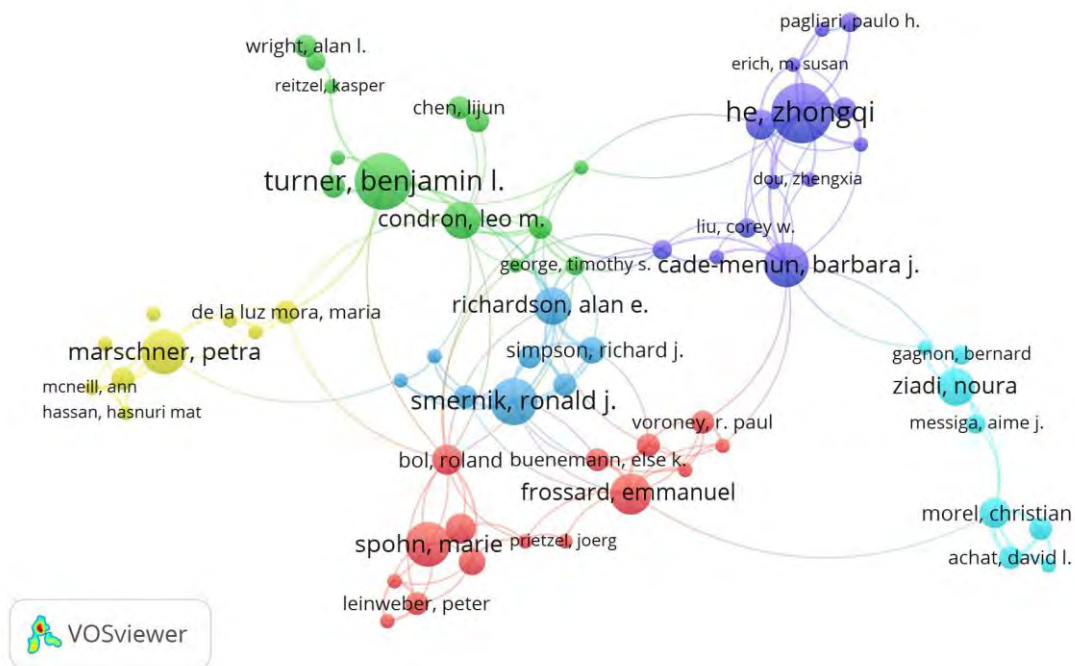


Figura 4. Mapa de co-autoria dos trabalhos publicados sobre fósforo orgânico do solo, no período 1998-2018. Foram selecionados autores com mínimo de 20 artigos listados na base de dados *Web of Science*. As linhas de conexão indicam os 200 links de co-ocorrência mais fortes entre os termos.

O cluster roxo (porção superior direita do mapa) também agrupou 13 pesquisadores, sendo os que mais publicaram artigos em co-autoria os cientistas Zhongqi, He; Cade-Menun, Barbara J e Honeycutt, C Wayne. O cluster amarelo, localizado na parte esquerda do mapa, agrupou nove termos, com maior colaboração científica entre os autores Petra, Marschner; Rengel, Zed e De La Luz Mora, Maria (Figura 4). O cluster azul escuro (centro do mapa) agrupou oito cientistas que publicam artigos sobre fósforo orgânico do solo como co-autores, sendo os mais frequentes Richardson, Alan E.; Simpson, Richard J. e Smernik, Ronald J. Já o agrupamento ocorrido no cluster azul claro (porção inferior direita do mapa) apresentou oito pesquisadores, com maior destaque para Moral, Christian e Ziadi, Noura (Figura 4).

3.6 CONCLUSÃO

O número de publicações e citações aumentou ao longo dos anos, com o maior número de publicações ocorrendo em 2015 e citações em 2018. O EUA é o país o mais produtivo, com 207 artigos (21,85% do total).

Os pesquisadores mais relevantes pertencem ao *staff* das instituições mais produtivas, sendo Condrón, L.M. o cientista que mais contribuiu com publicações. Os periódicos mais utilizados como fonte de divulgação científica foram *Geoderma*, *Communications in Soil Science and Plant Analysis* e *Plant and Soil*.

De maneira geral, os estudos recuperados tiveram como pontos centrais em comum a importância da biomassa microbiana do solo e a atividade das enzimas fosfatases no ciclo do P; a aplicação de fertilizantes de P e seus efeitos na longevidade das reservas de fosfato; a fixação de P no solo e seu acúmulo em formas indisponíveis; a eutrofização de corpos hídricos e o fato do P ser um recurso finito e insubstituível.

A pesquisa sobre P do solo representa um tema científico relevante para a segurança alimentar a nível global, e, portanto, deve ser considerado por governos e países em suas políticas científicas e tecnológicas.

3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU, S. T.; MALGWI, W. B. Spatial variability of soil physico-chemical properties in Kadawa irrigation project in Sudan Savanna Agroecology of Nigeria. **International Journal of Agricultural Research**, v.6, n.10, p.714-735, 2011.

ACHAT, D. L.; BAKKER, M. R.; MOREL, C. Process-based assessment of phosphorus availability in a low phosphorus sorbing forest soil using isotopic dilution methods. **Soil Science Society of America Journal**, v.76, n.6, p. 2131-2142, 2009.

ACHAT, D. L.; BAKKER, M. R.; ZELLER, B.; PALLERIN, S.; BIENAIMÉ, S.; MOREL, C. Long-term organic phosphorus mineralization in Spodosols under forests and its relation to carbon and nitrogen mineralization. **Soil Biology and Biochemistry**, v.42, n.9, p.1479-1490, 2010.

ALEIXO, S.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; COSTA, M. G.; SALES, M. V. S.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; MARQUES, J. R. B. P transformations in cacao agroforests soils in the Atlantic forest region of Bahia, Brazil. **Agroforestry Systems**, v.90, n.2, p.1-15, 2017.

ALEIXO, S.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; GAMA RODRIGUES, E.F.; SCHRIPSEMA, J. Organic phosphorus of soils under cacao agroforests in the Atlantic coast of Brazil. **Geoderma Regional**, v.17, e00220, 2019.

ALEWELL, C.; RINGEVAL, B.; BALLABIO, C.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P.; BORRELLI, P. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. **Nature Communications**, v.11, p.1-12, 2020.

ALOVISI, A. M. T.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; CURI, N.; ALOVISI, A. A. Silicon-phosphorus interactions in soils cultivated with bean plants. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.36, n.1, p.79-86, 2014.

ALVARES, C. A.; GONÇALVES, J. L. M.; VIEIRA, S. R.; SILVA, C. R.; FRANCISCATTE, W. Spatial variability of physical and chemical attributes of some forest soils in southeastern of Brazil. **Scientia Agricola**, v.68, n 6, p.697-705, 2011.

ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Estatísticas Indicadores: Principais Indicadores do Sector de Fertilizantes**. Disponível em: <<http://anda.org.br/index.php?mpg=03.00.00>>. Acesso em 15 dez. 2018.

ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Solos, análises dizem o que falta**. Revista DBO Agrotecnologia. Disponível em: <www.anda.org.br/portg/boletins> Acesso em: 7 nov. de 2018.

ANDRADE, C. A. O.; BORGHI, E.; BORTOLON, L.; BORTOLON, E.S.O.; CAMARGO, F.P.; AVANZI, J.C.; SIMON, J.; SILVA, R.R.; FIDELIS, R.R. Straw production and agronomic performance of soybean intercropped with forage species in no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, n.10, p.861-868, 2017.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2003.

ANGHINONI, I.; BARBER, S. A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.1041-1044, 1980.

AOKI, M.; FUJII, K.; KITAYAMA, K. Environmental Control of Root Exudation of Low-Molecular Weight Organic Acids in Tropical Rain forests. **Ecosystems**, v.15, n.7, p.1194-1203, 2012.

ARAUJO, M. A.; PEDROSO, A. V.; AMARAL, D. C.; ZINN, Y. L. Paragênese mineral de solos desenvolvidos de diferentes litologias na região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.1, p.11-25, 2014.

ARAÚJO, M. S. B.; SALCEDO, I. H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na Região Nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, n.4, p.643-650, 1997.

ARAÚJO, M. S. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. Frações de fósforo após extrações sucessivas com resina e incubação, em Latossolos e Luvisolos do semi-árido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.2, p.259-268, 2004.

ARAÚJO, R. F.; ALVARENGA, L. A bibliometria na pesquisa científica da pós-graduação brasileira de 1987 a 2007. **Encontros Bibli: Revista Eletrônica de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, v.16, n.31, p.51-70, 2011.

ARVANITIS, R.; CHATELIN, Y. Bibliometrics of tropical soil sciences: Some reflections and orientations. In: McDONALD, P., ed. **The literature of soil science**. Ithaca, Cornell University Press, 1994. p.73-94.

ASHLEY, K.; CORDELL, D.; MANIVIC, D. A brief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. **Chemosphere**, v.84, n.6, p.737-746, 2011.

ASSIS, R. L. Desenvolvimento rural sustentável no Brasil: perspectivas a partir da integração de ações públicas e privadas com base na agroecologia. **Economia Aplicada**, v.10, n.1, p.75-89, 2006.

ATANASOVA, L. G. Exergy analysis of the process of production of dicalcium phosphate dihydrate by decomposition of rock phosphate with hydrochloric acid. **Chemical Technology**, v.9, n.2, p.61-73, 2014.

BAHAMMOU, I.; ESAADY, A.; BOUKHRIS, S.; GHAILANE, R.; HABBADI, N.; HASSIKOU, A.; SOUIZI, A. Direct use of mineral phosphate fertilizers MAP, DAP, and TSP as heterogeneous catalysts in organic reactions. **Mediterranean Journal of Chemistry**, v.5, n.6, p.615-623, 2016.

BAHL, G. S.; PASRICHA, N. S. Efficiency of P utilization by pigeon pea and wheat grown in a rotation. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 51, n. 3, p. 225-229, 1998.

BAKER, A.; CEASAR, S. A.; PALMER, A. J. PATERSON, J. B.; QI, W.; MUENCH, S. P.; BALDWIN, S. A. Replace, reuse, recycle: improving the sustainable use of phosphorus by plants. **Journal of Experimental Botany**, v.66, n.12, p.3523-3540, 2015.

BARBIERI, D.M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; JUNIOR, N.S.; SIQUEIRA, D.S.; PANOSSO, A.R. Comportamento dos óxidos de ferro da fração argila e do fósforo adsorvido, em diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.6, 1557-1568, 2013.

BARRETO, M. L.; ARAGÃO, E.; SOUZA, L. E.; SANTANA, T. M.; BARATA, R. B. Diferenças entre medidas do índice h de diferentes fontes bibliográficas e mecanismos de busca. **Revista de Saúde Pública**, v.47,n.1, p.231-238, 2013.

BAVEYE, P. C. Looming scarcity of phosphate rock and intensification of soil phosphorus research. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.3, p.637-642, 2015.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.105-112, 1997.

BEATON, J. **Efficient Use of Fertilizer Use Manual: History**. Disponível em:<http://academic.uprm.edu/dsotomayor/agro6505/History_of_Fertilizer_Beaton.pdf> Acesso em: 09 jan. 2019.

BECQUER, A.; TRAP, J.; IRSHAD, U.; ALI, M. A.; CLAUDE, P. From soil to plant, the journey of P through trophic relationships and ectomycorrhizal association. **Frontiers in Plant Science**, v.5, p.1-7, 2014.

BEDIN, I.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.; FAQUIM, V.; TOKURA, A. M.; SANTOS, J. Z. L. Fertilizantes fosfatados e produção da soja em solos com diferentes capacidades tampão de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.639-646, 2003.

BEGUM, H. H.; TOFAZZAL, I. Role of synthesis and exudation of organic acids in phosphorus nutrition in plants in tropical soils. **Biotechnology**, v.4, n.4, p.333-340, 2005.

BENEDITO, D. S. **Eficiência agrônômica de fontes alternativas de fósforo e modelos de predição do uso de fosfatos naturais**. 2007. 150p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; SCHICK, J.; GUDAGNIN, J. C.; AMARALA, A. J. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.4 p.133-142, 2007.

BERTOL, I.; GUADAGNIN, J. C.; CASSOL, P. C.; AMARAL, A. J.; BARBOSA, F. T. Perdas de fósforo e potássio por erosão hídrica em um inceptisol sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.8, n.3, p.485-494, 2004.

BISSANI, C. A.; GIANELLO, C.; CAMARGO, F. A. de O.; TEDESCO, M. J. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas: importância do estudo da fertilidade do solo**. Porto Alegre: Metrópole, 2008.

BLAKE, L.; JOHNSTON, A.E.; POULTON, P.R.; GOULDING, K.W.T.Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. **Plant and Soil**, v.254, n.2, p.245-261, July 2003.

BLANK, A. F.; OLIVEIRA, A. S.; ARRIGONI-BLANK, M. F.; FAQUIN, V. Efeitos da adubação química e da calagem na nutrição de melissa e hortelã-pimenta. **Horticultura Brasileira**, v.24, n.2, p.195-198, 2006.

BORGES, B. M. M. N.; ABDALA, D. B.; SOUZA, M. F.; VIGLIO, L. M.; COELHO, M. J. A.; PAVINATO, P.S.; JUNQUEIRA, H. C. Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane by product and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield. **Geoderma**, v.339, p.20-30, 2019.

BORNMANN, L.; MUTZ, R. Growth rates of modern science: A bibliometric analysis based on the number of publications and cited references. **Journal of the Association for Information Science and Technology**, v.66, n.11, p.2215-2222, 2015.

BOUAIN, N.; SHAHZAD, Z.; ROUACHED, A.; KHAN, G. A.; BERTHOMIEU, P.; ABDELLY, C.; POIRIER, Y.; ROUACHED, H. Phosphate and zinc transport and signalling in plants: toward a better understanding of their homeostasis interaction. **Journal of Experimental Botany**, v.65, n.20, p.5725-5741, 2014.

BOWMAN, R. A.; COLE, C. V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. **Soil Science**, v.125, n.2, p.95-101, 1978.

BRASIL - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 5, de 23 de fevereiro de 2007**. Definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes minerais, destinados à agricultura. p.38, 2007.

BRUNER, P. H. Substance flow analysis as a decision support tool for phosphorus management. **Journal of Industrial Ecology**, v.14, n.6, p.870-873, 2010.

BUCHI, L.; WENDLING, M.; AMOSSÉ, C.; NECPALOVA, M.; CHARLES, R. Importance of cover crops in alleviating negative effects of reduced soil tillage and promoting soil fertility in a winter wheat cropping system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.256, n.2018, p.92-104, 2018.

BUCHANAN, M.; KING, L. D. Seasonal fluctuations in soil microbial biomass carbon, phosphorus and activity in no-till and reduced-chemical-input maize agroecosystems. **Biology and Fertility Soils**, v.13, p.211-217, 1992.

BÜNEMANN, E. K. Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus: A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v.89, p.82-98, 2015.

BURNEY, J. A.; DAVIS, S. J.; LOBELL, D. B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. **Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America**, v.107, n.26, p.12052-12057, 2010.

CADE-MENUN, B. J. Characterizing phosphorus in environmental and agricultural samples by ^{31}P nuclear magnetic resonance spectroscopy. **Talanta**, v.66, p.359-371, 2005.

CADE-MENUN, B. J.; ELKIN, K. R.; LIU, C. W.; BRYANT, R. B.; KLEINMAN, P. J. A.; MOORE, P. A. Characterizing the phosphorus forms extracted from soil by the Mehlich III soil test. **Geochemical Transactions**, v.19, n.7, p.1-17, 2018.

CARNEIRO, L. F.; RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; SANTOS, J. Z. L.; CURTI, N.; REIS, T. H. P.; VALLE L. A. R. Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.2, p.483-491, 2011.

CARSTENSEN, A.; HERDEAN, A.; SCHMIDT, S. B.; SHARMA, A.; SPETEA, C.; PRIBIL, M.; HUSTED, S. The Impacts of phosphorus deficiency on the photosynthetic electron transport chain. **Plant Physiology**, v.177, p.271-284, 2018.

CARVALHO, J. R. P.; DECHEN, S. C. F.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial da agregação do solo avaliada pela geometria fractal e geoestatística. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p.1-9, 2004.

CEASAR, S. A. feeding world population amidst depleting phosphate reserves: The role of biotechnological interventions. **The Open Biotechnology Journal**, v.12, p.51-55, 2018.

CECATO, U.; SKROBOT, V. D.; FAKIR, G. M.; JOBIM, C. C.; BRANCO, A. F.; GALBEIRO, S.; JANEIRO, V. Características morfogênicas do capim mombaça (*Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaça) adubado com fontes de fósforo, sob pastejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.36, n.6, p.1699-1706, 2007.

CEROZI, B. S.; FITZSIMMONS, K. The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution. **Bioresource Technology**, v.219, p.778-781, 2016.

CHANG, S. S.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, v.84, p. 133-144, 1957.

CHEN, C. R.; CONDRON, L. M.; DAVIS, M. R.; SHERLOCK, R. R. Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and radiate pine (*Pinus radiata* D. Don.). **Soil Biology and Biochemistry**, v.34, p.487-499, 2002.

CHEN, M.; GRAEDEL, T. E. A half-century of global phosphorus flows, stocks, production, consumption, recycling, and environmental impacts. **Global Environmental Change**, v.36, p.139-152, 2016.

CHOJNACKA, K.; MOUSTAKAS, K.; WITEK-KROWIAK, A. Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy. **Bioresource Technology**, v.295, e122223, 2020.

CHOWDHURY, R. B.; MOORE, G. A.; WEATHERLEY, A. J.; ARORA, M. Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food

security, and options for mitigation. **Journal of Cleaner Production**, v.140, n.2, p.945-963, 2017.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 743-753, 2003.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.777-788, 2005.

CONDRON, L. M.; NEWMAN, S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. **Soils and Sediments**. v.11, p.830-840, 2011.

CONDRON, L. M.; TURNER, B. L.; CADE-MENUN, B.J. Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. In: SHARPLEY, A.N.; SIMS, J.T. (eds) **Phosphorus: agriculture and the environment**. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 87-121, 2005.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.925-930, 2002.

COOPER, J.; LOMBARDI, R.; BOARDMAN, D.; CARLIELL-MARQUET, C. The future distribution and production of global phosphate rock reserves. **Resources, Conservation and Recycling**, v.57, p.78-86, 2011.

CORÁ, J. E.; ARAÚJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.1013-1021, 2004.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: global foodsecurity and food for thought. **Global Environmental Change**, v.19, n.2, p.292-305, 2009.

CORDELL, D.; ROSEMARIM, A.; SCHRÖDER, J. J.; SMIT, A. L. Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options. **Chemosphere**, v.48, n.6, p.747-758, 2011.

CORRÊA, J. C.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, D. M.; PERES, M. G. M. Aplicação superficial de diferentes fontes de corretivos no crescimento radicular e produtividade da aveia preta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.4, p.1583-1590, 2008.

CUNHA, G. M.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; COSTA, G. S.; VELLOSO, A. C. X. Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.667-671, 2007.

DAI, Z.; LIU, G.; CHEN, H.; WANG, J.; AI, S.; WEI, D.; LI, D.; MA, B.; TANG, C.; BROOKES, P.C.; XU, J. Long-term nutrient inputs shift soil microbial functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosystems. **The ISME Journal**, v.14, p.757-770, 2020.

DAL PIZZOL, L.; DE MOURA SPERONI, R.; ZANCANARO, A.; GAUTHIER, F. O.; TODESCO, J.L. Análise bibliométrica da produção científica sobre Linked Data. **Informação & Informação**, v.20, n.3, p.77-112, 2015.

DAMON, P. M.; BOWDEN, B.; ROSE, T.; RENGEL, Z. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: a review. **Soil Biology and Biochemistry**, v.74, p.127-137, 2014.

DANESHGAR, S.; CALLEGARI, A.; CAPODAGLIO, A. G.; VACCARI, D. The potential phosphorus crisis: resource conservation and possible escape technologies: a review. **Resources**, v.7, n.2, p.37, 2018.

DARCH, T.; BLACKWELL, M. S. A.; CHADWICK, D.; HAYGARTH, P. M.; HAWKINS, J. M.; TURNER, B. L. Assessment of bioavailable organic phosphorus in tropical forest soils by organic acid extraction and phosphatase hydrolysis. **Geoderma**, v.284, p.93-102, 2016.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ-V, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG SBCS, 2007. 471p.

DELBARI, M.; AFRASIAB, P.; GHARABAGHI, B.; AMIRI, M.; SALEHIAN, A. Spatial variability analysis and mapping of soil physical and chemical attributes in a salt-affected soil. **Arabian Journal of Geosciences**, v.12, p.1-12, 2019.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB**: geostatistical software library and user's guide. New York: Oxford University Press, 1998. 369p.

DIAS, J. S.; NEVES, I.; SILVEIRA, V. H. **Nutrientes**: Do que as plantas precisam? Unifertil, 2012. Disponível em: <<http://www.unifertil.com.br/admin/files/rc20121011151121.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Significance and potential uses of soil enzymes. In: METTING JUNIOR, F. B. (Ed.). **Soil microbial ecology applications in agricultural and environmental management**. New York: M. Dekker, 1993. p.95-127.

DHILLON, J.; TORRES, G.; DRIVER, E.; FIGUEIREDO, B.; RAUN, W. R. World phosphorus use efficiency in cereal crops. **Agronomy Journal**, v.109,n.4, p.1670-1677, 2017.

DOBERMANN, A.; FAIRHURST, T. H. **Rice: Nutrient disorders and nutrient management**. Potash and Phosphate Institute, Singapore, and International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 2000, 191 p.

DRURY, M. Global futures and government towns: Phosphates and the production of western Sahara as a space of contention. **The Arab World Geographer**, v.16, n.1, p.101-124, 2013.

DUARTE, I. B.; GALLO, A. S.; GOMES, M. S.; GUIMARÃES, N. F.; ROCHA, D. P.; SILVA, R. F. Plantas de cobertura e seus efeitos na biomassa microbiana do solo. **Acta Iguazu**, v.3, n.2, p.150-165, 2014.

DUDA, G. P.; ALMEIDA, D. L.; GUERRA, J. G. M.; SALVIANO, A. M. Caracterização de fósforo e carbono orgânico em solos cultivados com diversas culturas em sistema de produção agroecológica. **Revista Científica Rural**, v.11, n.2, p.24-32, 2006.

DUDA, G. P.; GUERRA, J. G. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; RIBEIRO, M. R. Phosphorus bioavailable evaluation in different soil classes from Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, p. 1563-1576, 2013.

EICHLER-LÖBERMANN, B. E.; KÖHNE, S.; KÖPPEN, D. Effect of organic, inorganic, and combined organic and inorganic P fertilization on plant P uptake and soil P pools. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.170, n.5, p.623-628, 2007.

ELSER, J.; BENNETT, E. Phosphorus cycle: A broken biogeochemical cycle. **Nature**, v.478, p.29-31, 2011.

ELSER, J. J. Phosphorus: a limiting nutrient for humanity? **Current Opinion in Biotechnology**, v.23, n.6, p.833-838, 2012.

FAGERIA, N. K.; GHEYI, H. R.; CARVALHO, M. C. S.; MOREIRA, A. Root growth, nutrient uptake and use efficiency by roots of tropical legume cover crops as influenced by phosphorus fertilization. **Journal of Plant Nutrition**, v.39, p.781-792, 2016.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.1, p.6-16, 1998.

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

FAO. **Agricultural Outlook 2015**, Organisation for Economic Co-operation and Development and Food and Agriculture Organization of the United Nations, OECD Publishing, 2015

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Fertilizer use by crop in Brazil**. Roma, 2004, 52p.

FERREIRA, J. T. FERREIRA, E. P. SILVA, W. C. ROCHA, I. T. M. Atributos químicos e físicos do solo sob diferentes manejos na microrregião serrana dos Quilombos – Alagoas. **Agrarian Academy**, Centro Científico Conhecer, v.1, n.1; p.89-101, 2014.

FIGUEIREDO C. C.; BARBOSA, D. V.; OLIVEIRA, S. A.; FAGIOLI, M.; SATO, J. H. Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e parâmetros morfológicos de milho. **Revista Ciência Agronômica**, v.43, n.3, p.446-452, 2012.

FILIPPELLI, G. M. Balancing the global distribution of phosphorus with a view toward sustainability and equity. **Global Biogeochemical Cycles**, v.32, n.6, p.904-908, 2018.

FILIPPELLI, G. M. Phosphate rock formation and marine phosphorus geochemistry: the deep time perspective. **Chemosphere**, v.84, p.759-766, 2011.

FIRME, S. M.; MIRANDA, A. C. D.; SILVA, J. A. Produção do conhecimento científico: um estudo das redes colaborativas. **Biblos: Revista do Instituto de Ciências Humanas e da Informação**, v.31, n.2, p.45-61, 2017.

FONTOURA, S. M. V.; VIEIRA, R. C. B.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MORAES, R. P. Agronomic performance of phosphate fertilizers in anoxisol under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.6, p.1907-1914, 2010.

FRAZÃO, L. A.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado matogrossense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 641-648, 2008.

FRYDENVANG, J.; VAN MAARSCHALKERWEERD, M.; CARSTENSEN, A.; MUNDUS, S.; SCHMIDT, S. B.; PEDAS, P. R.; LAURSEN, K. H.; SCHJOERRING, J. K.; HUSTED, S. Sensitive detection of phosphorus deficiency in plants using chlorophyll *a* fluorescence. **Plant Physiology**, v.169, p.353-361, 2015.

GALLO, A. S.; GUIMARÃES, N. F.; CUNHA, C; SANTOS, R. D. P.; CARVALHO, E. M. Indicadores da sustentabilidade de uma propriedade rural de base familiar no estado de Mato Grosso do Sul. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.11, n.3, p.104-114, 2016.

GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; COMERFORD, N. B. Biomass and nutrient cycling in pure and mixed stands of native tree species in southeastern Bahia, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.287-298, 2007.

GAMA-RODRIGUES, A. C.; SALES, M. V. S.; SILVA, P. S. D.; COMERFORD, N. B.; CROPPER, W. P.; GAMA-RODRIGUES, E. F. An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. **Biogeochemistry**, v.118, p.453-469, 2014.

GANG, XU.; HONGBO, S.; RONGFU, X.; NIE, Y.; PEI, Y.; SUN, Z.; BLACKWELL, M. S. A. The role of root-released organic acids and anions in phosphorus transformations in a sandy loam soil from Yantai, China. **African Journal of Microbiology Research**, v.6, n.3, p.674-679, 2012.

GAO, W.; GUO, H. C. Nitrogen research at watershed scale: a bibliometric analysis during 1959-2011. **Scientometrics**, v.99, n.3, p.737-753, 2014.

GARCÍA-GONZALEZ, I.; HONTORIA, C.; GABRIEL, J. L.; ALONSO-AYUSO, M.; QUEMADA, M. Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. **Geoderma**, v. 322, n.2018, p.81-88, 2018.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Biodinâmica de Solos) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B. J.

R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. v.8, p.141-187.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; BRUNETTO, G. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.v.43, n.8, p.1085-1091, 2008.

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

GATIBONI, L. C.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, A. F. C.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J.; LIMA, M. A. S. Phosphorus forms and availability assessed by ³¹P-NMR in successively cropped soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.36, p.2625-2640, 2005.

GEMENET, D. C.; LEISER, D. L.; BEGGI, F.; HERRMANN, L. H.; VADEZ, V.; RATTUNDE, H. F.; WELTZIEN, E.; HASH, C. T.; BUERKERT, A.; HAUSSMANN, B. I. Overcoming phosphorus deficiency in West African pearl millet and *Sorghum* production systems: Promising options for crop improvement. **Frontiers in Plant Science**, v.7, p.1-10, 2016.

GEORGE, T.; GILES, C.; MENEZES-BLACKBURN, D.; CONDRON, L. M.; GAMARODRIGUES, A.; JAISI, D.; LANG, F.; NEAL, A. L.; STUTTER, M. I.; ALMEIDA, D. S.; BOL, R.; CABUGAO, K. G.; CELI, L.; COTNER, J. B.; FENG, G.; GOLL, D. S.; HALLAMA, M.; KRUEGER, J.; PLASSARD, C.; ROSLING, A.; DARCH, T.; FRASER, T.; GIESLER, R.; RICHARDSON, A. E.; TAMBURINI, F.; SHAND, C. A.; LUMSDON, D. G.; ZHANG, H.; BLACKWELL, M. S. A.; WEARING, C.; MEZELI, M. M.; ALMÅS, Å. R.; AUDETTE, Y.; BERTRAND, I.; BEYHAUT, E.; BOITT, G.; BRADSHAW, N.; BREARLEY, C. A.; BRUULSEMA, T. W.; CIAIS, P.; COZZOLINO, V.; DURAN, P. C.; MORA, M. L.; MENEZES, A. B.; DODD, R. J.; DUNFIELD, K.; ENGL, C.; FRAZÃO, J. J.; GARLAND, G.; GONZÁLEZ JIMÉNEZ, J. L.; GRACA, J.; GRANGER, S. J.; HARRISON, A. F.; HEUCK, C.; HOU, E. Q.; JOHNES, P. J.; KAISER, K.; KJÆR, H. A.; KLUMPP, E.; LAMB, A. L.; MACINTOSH, K. A.; MACKAY, E. B.; McGRATH, J.; McINTYRE, C.; McLAREN, T.; MÉSZÁROS, E.; MISSONG, A.; MOOSHAMMER, M.; NEGRÓN, C. P.; NELSON, L. A.; PFAHLER, V.; POBLETE-GRANT, P.; RANDALL, M.; SEGUEL, A.; SETH, K.; SMITH, A. C.; SMITS, M. M.; SOBARZO, J. A.; SPOHN, M.; TAWARAYA, K.; TIBBETT, M.; VORONEY, P.; WALLANDER, H.; WANG, L.; WASAKI, J.; HAYGARTH, P. M. Organic phosphorus in the terrestrial environment: A perspective on the state of the art and future priorities. **Plant and Soil**, v. 247, n.1-2, p.191-208, 2018.

GEORGE, T. S. ; SIMPSON, R. J.; GREGORY, P. J.; RICHARDSON, A. E. Differential interaction of *Aspergillus niger* and *Peniophora lycii* phytases with soil particles affects the hydrolysis of inositol phosphates. **Soil Biology Biochemistry**, v.39, n.3, p.793-803, 2007

GIOVANNINI, C.; GARCIA-MINA, J. M.; CIAVATTA, C.; MARZADORI, C. Effect of organic-complexed superphosphates on microbial biomass and microbial activity of soil. **Biology and Fertility of Soils**, v.49, n.4, p.395-401, 2013.

GOEBEL, M. O.; ADAMS, F.; BOY, J.; GUGGENBERGER, G.; MIKUTTA, R. Mobilization of glucose-6-phosphate from ferrihydrite by ligand-promoted dissolution is higher than of orthophosphate. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.v.180, n.3, p.279-282, 2017.

GOEDERT, W. J.; LOBATO, E. Eficiência agronômica de fosfatos em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.15, p.311-318, 1980.

GOEDERT, W. J.; LOBATO, E. Eficiência agronômica de fosfatos em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.8, p.97-102, 1984.

GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMASIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações Agronômicas**, n. 95, Piracicaba, Instituto Potafos, 2001.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade especial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.169-177, 2005.

GROTH, M. Z.; ROZA-GOMES, M. F.; LAJÚS, C. L. Avaliação da fertilidade do solo no município de São José Do Cedro, SC, Brasil. **Evidência**, v. 13 n. 2, p. 109-122, 2013.

GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA D. L.; SANTOS G. A.; FERNANDES M. S. Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, p.291-299, 1996.

GUIMARÃES, N. F.; GALLO, A. S.; SANTOS, C. C.; MORINIGO, K. P. G.; BENTOS, A. B.; CARVALHO, E. M. Avaliação da sustentabilidade de um agroecossistema pelo método MESMIS. **Scientia Plena**, v.11, n.5, p.1-11, 2015.

GUIMARÃES, P. T. G. Adubação do cafeeiro e a qualidade do produto colhido. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. 261, p. 39-51, 2011.

GUPPY, C. N.; MENZIES, N. W.; MOODY, P. W.; BLAMEY, F. P. C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v.43, p.189-202, 2005

HALLAMA, M.; PEKRUN, C.; LAMBERS, H.; KANDELER, E. Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. **Plant and Soil**, v.434, p.7-45, 2019.

HAMMOND J. P.; BROADLEY M. R.; WHITE P. J.; KING G. J.; BOWEN H. C.; HAYDEN R.; MEACHAM, M.C.; MEAD, A.; OVERS, T.; SPRACKLEN, W.P.; GRENNWOOD, D.J. Shoot yield drives phosphorus use efficiency in *Brassica oleracea* and correlates with root architecture traits. **Journal of Experimental Botany**, v.60, n.7, p.1953-1968, 2009.

HAMMOND, J. P.; WHITE, P. J. Sucrose transport in the phloem: integrating root responses to phosphorus starvation. **Journal of Experimental Botany**, v.59, n.1, p.93-109, 2008.

- HASH, C. T.; SCHAFFERT, R. E.; PEACOCK, J. M. Prospects for using conventional techniques and molecular biological tools to enhance performance of 'orphan' crop plants on soils low in available phosphorus. **Plant and Soil**, v.245, n.1, p.135-146, 2002.
- HAUNSCHILD, R.; BORNMANN, L.; MARX, W. Climate change research in view of bibliometrics. **PloS ONE**, v.11, n.7, e0160393, 2016.
- HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; **Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management**, 7th ed., Prentice Hall: New Jersey, 2005.
- HAYGARTH, P. M.; BARDGETT, R. D.; CONDRON, L.M. Nitrogen and phosphorus cycles and their management. In: **Soil Conditions and Plant Growth**. Eds. GREGORY, P. J.; NORTCLIFF, S. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, pp.132-159, 2013.
- HAYGARTH, P. M.; HARRISON, A. F.; TURNER, B. L. On the history and future of soil organic phosphorus research: a critique across three generations. **European Journal of Soil Science**, v.69, n.1, p.86-94, 2018a.
- HAYGARTH, P. M.; HINSINGER, P.; BLACKBURN, D. Organic phosphorus: potential solutions for phosphorus security. **Plant and Soil**, v.427, n.1-2, p.1-3, 2018b.
- HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.46, n.5, p.970-976, 1982.
- HINSINGER P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, v.237, n.2, p.173-195, 2001.
- HINSINGER, P.; HERRMANN, L.; LESUEUR, D.; ROBIN, A.; TRAP, J.; WAITHAISONG, K.; PLASSARD, C. **Impact of roots, microorganisms and microfauna on the fate of soil phosphorus in the rhizosphere**. Annual Plant Reviews Volume 48: John Wiley and Sons, Inc., 2015, p.375-407. 2015
- HOFMANN, K.; HEUCK, C.; SPOHN, M. Phosphorus resorption by young beech trees and soil phosphatase activity as dependent on phosphorus availability. **Oecologia**, v. 181, p.369-379, 2016.
- HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência agrônômica dos fosfatos naturais. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p.665-688.
- HUANG, L. M.; JIA, X. X.; ZHANG, G. L. Soil organic phosphorus transformation during ecosystem development: A review. **Plant and Soil**, v.417, p.17-42, 2017.
- HYLAND, C.; KETTERINGS, Q.; DEWING, D.; STOCKIN, K.; ALBRECHT, G.; GEOHRING, L. **Phosphorus basics: the phosphorus cycle**. New York: Cornell University, 2005. 2 p. (Agronomy Fact Sheet Series).
- IVELL, D. M. Phosphate Fertilizer Production – From the 1830's to 2011 and Beyond. **Procedia Engineering**, v.46, p.166-171, 2012.

JAKOBSEN, S. T. Interaction between Plant Nutrients: 1. Theory and Analytical Procedures. **Journal Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science**, v. 42, n.4, p.208-212, 1992.

JOHNSTON, A. E.; STEEN, I. **Understanding phosphorus and its use in agriculture**. Brussels, Belgium: European Fertilisers Manufacturers' Association; 2000.

KANANOVÁ, M.; LATTANZI, F. A.; GRIMOLDI, A. A.; SCHNYDER, H. Phosphorus deficiency decreases cell division and elongation in grass leaves. **Plant Physiology**, v.141, n.2, p.766-775, 2006.

KARUNANITHI, R.; SZOGY, A.; BOLAN, N.; NAIDU, R.; OK, Y. S.; KRISHNAMURTHY, S.; SESHADRI, B. Phosphorus recovery from wastes. In: PRASAD, M. N. V.; SHIH, K. (Eds.). **Environmental Materials and Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention**. London, UK: Academic Press/Elsevier, 2015, p.687-705.

KHADEMI, Z.; JONES, D. L.; MALAKOUTI, M. J.; ASADI, F. Organic acids differ in enhancing phosphorus uptake by *Triticum aestivum* L. -effects of rhizosphere concentration and counterion. **Plant and Soil**, v.334, n.1-2, p.151-159, 2010.

KLEIN, C.; AGNE, S. A. A. Fósforo: de nutriente à poluente. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.8, n.8, p.1713-1721, 2012

KLIEMANN, H. J.; LIMA, D. V. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais e sua influência no fósforo disponível em dois solos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.31, n.2, p.111-119, 2001.

KOPPELAAR, R. H. E. M.; WEIKARD, H. P. Assessing phosphate rock depletion and phosphorus Recycling options. **Global Environmental Change**, v.23, n.6, p.1454-1466, 2013.

KORNDÖRFER, G. H.; LARA-CABEZAS, W. A.; HOROWITZ, N. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agricola**, v.56, n.2, p.391-396, 1999.

KRUSE, J.; ABRAHAM, M.; AMELUNG, W.; BAUM, C.; BOL, R.; KÜHN, O.; LEWANDOWISK, H.; NIERDERBERGER, J.; OELMANN, Y.; RÜGER, C.; SANTNER, J.; SIEBERS, M.; SIEBERS, N.; SPOHN, M.; VESTERGREN, J.; VOGTS, A.; LEINWEBER, P. Innovative methods in soil phosphorus research: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.178, n.1, p.43-88, 2015.

LABOSKI, C. A. M.; LAMB, J. A. Changes in soil test phosphorus concentration after application of manure or fertilizer. **Soil Science Society of America Journal Abstract**, v.7, n.2, p.544-554, 2003.

LANA, M. C.; RAMPIM, L.; SCHULZ, L. R.; KAEFER, J. E.; HARTMANN-SCHMIDT, M. A.; RUPPENTHAL, V. Disponibilidade de fósforo para plantas de milho cultivadas com fertilizante organomineral e fosfato monoamônico. **Scientia Agraria Paranaensis**, v.13, n.3, p.198-209, 2014.

LANG, F.; KRÜGER, J.; AMELUNG, W.; WILLBOLD, S.; FROSSARD, E.; BÜNEMANN, E. K. Soil phosphorus supply controls P nutrition strategies of beech forest ecosystems in Central Europe. **Biogeochemistry**, v.136, n.1, p.5-29, 2017.

LEÃO, A. B.; ANDRADE, A. R. S.; CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; GUERRA, H. O. C. Variabilidade espacial de fósforo em solo do perímetro irrigado Engenheiro Arcoverde, PB. **Revista Ciência Agronômica**, v.38, n.1, p.1-6, 2007.

LEITE, J. N. F. **Formas orgânicas e inorgânicas de fósforo no Solo em função de plantas de cobertura e de adubação nitrogenada**. 2015. 57 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal, 2015

LEÓN, L. A.; FENSTER, W. E.; HAMMOND, L. L. Agronomic potential of eleven phosphate rocks, from Brazil, Colombia, Peru and Venezuela. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, n.2, p.798-802, 1986.

LI, M.; WIEDMANN, T.; HADJIKAKOU, M. Towards meaningful consumption-based planetary boundary indicators: The phosphorus exceedance footprint. **Global Environmental Change**, v. 54, p. 227-238, 2019.

LIAO, J.; HUANG, Y. Global trend in aquatic ecosystem research from 1992 to 2011. **Scientometrics**, v.98, n.2, p.1203-1219, 2014.

LIMA, C. C. Disponibilidade de fósforo para a cana-de-açúcar em solo tratado com compostos orgânicos ricos em silício. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.12, p.1222-1227, 2011.

LIMA, H. V. de; OLIVEIRA, T. S.; OLIVEIRA, M. M.; MENDONÇA, E. S.; LIMA, P. J. B. F. Indicadores da qualidade do solo em sistemas de cultivo orgânico e convencional no semiárido cearense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1085-1098, 2007.

LIMA, R. A. R.; MENDONCA, V.; TOSTA, M. S.; REIS, L. L.; BISCARO, G. A.; CHAGAS, E. A. Fósforo e zinco no crescimento de mudas de maracujazeiro-amarelo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, p.251-256, 2007.

LIU, J.; HU, Y.; YANG, J.; ABDI, D.; CADE-MENUN, B. J. Investigation of soil legacy phosphorus transformation in long-term agricultural fields using sequential fractionation, P K-edge XANES and solution P NMR spectroscopy. **Environmental Science & Technology**, v.49, n.1, p.168-176, 2015.

LIU, Y.; GAO, P.; ZHANG, L.; NIU, X.; WANG, B. Spatial heterogeneity distribution of soil total nitrogen and total phosphorus in the Yaoxiang watershed in a hilly area of northern China based on geographic information system and geostatistics. **Ecology and Evolution**, v.6, p.6807-6816, 2016.

LOMBI, E.; MCLAUGHLIN, M. J.; JOHNSTON, C.; ARMSTRONG, R. D.; HOLLOWAY, R. E. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. **Soil Science Society of America Journal Abstract**, v.68, n.2, p.682-689, 2004.

LÓPEZ-ARREDONDO, D. L.; LEYVA-GONZÁLEZ, M. A.; GONZÁLEZ-MORALES, S. I.; LÓPEZ-BUCIO, J.; HERRERA-ESTRELLA, L. Phosphate nutrition: Improving low-phosphate tolerance in crops. **Annual Review of Plant Biology**, v.65, n.1, p.95-123, 2014.

LOTT, J. N. A.; BOJARSKI, M.; KOLASA, J.; BATTEN, G. D.; CAMPBELL, L.C. A review of the phosphorus content of dry cereal and legume crops of the world. **International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology**, v.8, n.5-6, 351-370, 2009.

LU, C.; TIAN, H. Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half century: shifted hot spots and nutrient imbalance. **Earth System Science Data**, v. 9, n. 1, p. 181-192, 2017.

LUIZÃO, F. J.; FEARNSTIDE, P. M.; CERRI, C. E. P.; LEHMANN, J. 2009. The maintenance of soil fertility in Amazonian managed systems. p. 311-336. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; SILVA DIAS, P. (Eds.). **Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Series, Volume 186**. Washington, DC, U.S.A.: American Geophysical Union (AGU), 2009. 565 p.

MACHADO, M. I. C. S.; BRAUNER, J. L.; VIANNA, A. C. T. Formas de fósforo na camada arável de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.3, p.331-336, 1993.

MALAVOLTA, E. **Ele é essencial - sem fósforo as plantas não vivem**. Arquivo do Agrônomo N° 10 (tradução). POTAFOS, Piracicaba - SP, 2p, 1996.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1980. 251p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981.596p.

MARANGON, L. C.; SOARES, J. J.; FELICIANO, A. L. P.; LANI, J. L.; MATOS, L. V. Relação entre vegetação e pedoformas na Mata do Paraíso, município de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v.37, n.3, p.441-450, 2013.

MARGENOT, A. J.; PAUL, B. K.; SOMMER, R. R.; PULLEMAN, M. M.; PARIKH, S. J.; JACKSON, L. E.; FONTE, S. J. Can conservation agriculture improve phosphorus (P) availability in weathered soils? Effects of tillage and residue management on soil P status after 9 years in a Kenyan Oxisol. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.166, p.157-166, 2017.

MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.8, p.143-152, 2008.

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

MARUMOTO, T. Mineralization of C and N from microbial biomass in paddy soil. **Plant and Soil**, v.76, p.165-173, 1984.

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

MCGILL, S. M. 'Peak' phosphorus? The implications of phosphate scarcity for sustainable investors. **Journal of Sustainable Finance & Investment**, v.2, n.3-4, p.222-239, 2012.

MELO, G. B.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; GUARESCHI, R. F.; SOARES, P. F. C. Estoques e frações da matéria orgânica do solo sob os sistemas plantio direto e convencional de repolho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1511-1519, 2016.

MENEZES-BLACKBURN, D.; GILES, C.; DARCH, T.; GEORGE, T. S.; BLACKWELL, M.; STUTTER, M.; SHAND, C.; LUMSDON, D.; COOPER, P.; WENDLER, R.; BROWN, L.; ALMEIDA, D. S.; WEARING, C.; ZHANG, H.; HAYGARTH, P. M. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. **Plant and Soil**, v.247, n.1-2, p.5-16, 2018.

MOLIN, P. V. D.; RAMPIM, L.; FÁVERO, F.; LANA, M. C.; SARTO, M. V. M.; ROSSET, J. S.; MATTEI, D.; DIEL, P. S.; MOLIN, R. N. D. Response to simple superphosphate and top-phos fertilizer on wheat in an Oxisoil. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v.18, p.121-132, 2015.

MORETTO, J. L. **Termofosfatos: eficiência agrônômica e alterações químicas em solos com diferentes concentrações iniciais de fósforo**. 2017. 83p. Dissertação (Mestrado em Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2017.

MOTOMIYA, A. V. A.; MOLIN, J. P.; MOTOMIYA, W. R.; VIEIRA, S. R. Spatial variability of soil properties and cotton yield in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.996-1003, 2011.

NAGARAJAH, S.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. **Competitive adsorptions of phosphate with polygalacturonate and other organic anions on kaolinite and oxide surfaces**. *Nature*, London, 1970, p. 83-84.

NANNIPIERI, P.; GIAGNONI, L.; LANDI, L.; RENELLA, G. Role of phosphatase enzymes in soil. In: BÜNEMANN, E. K.; OBERSON, A.; FROSSARD, E. editors. **Phosphorus in action: biological processes in soil phosphorus cycling**. New York: Springer; 2011. p.215-43.

NARDI, P.; DI MATTEO, G.; PALAHI, M.; MUGNOZZA G. S. Structure and Evolution of Mediterranean Forest Research: A Science Mapping Approach. **PLoS ONE**, v.11, n.5, e0155016, 2016.

NASH, D. M.; HAYGARTH, P.M.; TURNER, B. L.; CONDRON, L.M.; MCDOWELL, R.W.; RICHARDSON, A. E.; WATKINS, M.; HEAVEN, M. W. Using organic phosphorus to sustain pasture productivity: a perspective. **Geoderma**, v.221-222, p.11-19, 2014.

NAVARRETE, I. A.; ASIO, V. B. Research productivity in soil science in the Philippines. **Scientometrics**, v.100, n.1, p.261-272, 2014.

NEGASSA, W.; BAUM, C.; SCHLICHTING, A.; MULLER, J.; LEINWEBER, P. Small-Scale Spatial Variability of Soil Chemical and biochemical properties in a rewetted degraded Peatland. **Frontiers in Environmental Science**, v.7, p.1-15, 2019.

NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 172, p. 305-325, 2009.

NELSON, N. O.; JANKE, R. R. Phosphorus sources and management in organic production systems. **HortTechnology**, v.17, n.4, p.442-454, 2007.

NIEDERBERGER, J.; KOHLER, M.; BAUHUS, J. Distribution of phosphorus fractions with different plant availability in German forest soils and their relationship with common soil properties and foliar P contents. **SOIL**, v.5, p.189-204, 2019.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, DPS, 1999. 399p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. 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, 2007. p.737-768.

OBERSTEINER, M.; PEÑUELAS, J.; CIAIS, P.; VAN DER VELDE, M.; JANSSENS, I. A. The phosphorus trilemma. **Nature Geoscience**, v.6, p.897-898, 2013.

OLIVEIRA FILHO, J. S.; PEREIRA, M. G.; AQUINO, B. F.; VIANA, T. V. A. Phosphorus forms and adsorption in a typic quartzipsamment cultivated with sugarcane harvested without burning. **Revista Caatinga**, v.30, n.2, p.343 -352, 2017.

OLIVEIRA, L. B.; TIECHER, T.; QUADROS, F. L. F.; RHEINHEIMER, D.S. Fósforo microbiano em solos sob pastagem natural afetado por queima e pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1509-1515, 2011.

OLIVEIRA, R. I.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; ZAIA, F. C.; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A. Fósforo orgânico em horizontes diagnósticos superficiais de diferentes classes de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.5, p.1411-1420, 2014.

PADILHA, K. M.; FREIRE, M. B. G. S.; DUDA, G. P.; SANTOS, U. J.; SILVA, A. O.; SOUZA, E. R. Indicadores biológicos de dois solos com a incorporação de subproduto da agroindústria de café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.5, p.1377-1386, 2014.

PALM, C.; BLANCO-CANQUI, H.; DECLERCK, F.; GATERE, L.; GRACE, P. Conservation agriculture and ecosystem services: an overview. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.187, p.87-105, 2014.

PANDAY, D.; OJHA, R. B.; CHALISE, D.; DAS, S.; TWANABASU, B. Spatial variability of soil properties under different land use in the Dang district of Nepal. **Cogent Food & Agriculture**, v.5, n.1, 1600460, 2019.

PANTANO, G.; GROSSELI, G. M.; MOZETO, A. A.; FADINI, P. S. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Química Nova**, v.39, n.6, p.732-740, 2016.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances of Agronomy**, v.30, p.1-50, 1978.

PAVAN, M. A.; CHAVES, J. C. D. Alterações nas frações de fósforo no solo associadas com a densidade populacional de cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, n. 2, p. 251-256, 1996.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil and Tillage Research**, v.105, p.149-155, 2009.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Effects of organic compounds produced by plants on soil nutrient availability. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.911-920, 2008.

PHILLIPS, A. B.; WEBB, J. R. Production, marketing and use os phosphorus fertilizers. In: OLSON, R. A.; ARMY, T. J.; HANWAY, J. J.; KILMER, V. J. (Ed.). **Fertilizer technology & use**. 2nd ed. Madison, Winsconsin USA: Soil Science Society of America, 1971. p.271-302.

POGRZEBA, M.; RUSINOWSKI, S.; KRZYZAK, J. Macroelements and heavy metals content in energy crops cultivated on contaminated soil under different fertilization - case studies on autumn harvest. **Environmental Science and Pollution Research International**, v.25, n.12, p.12096-12106, 2018.

POWER, A. G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v.365, n.1554, p.2959-2971, 2010.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.9, p.1199-1204, 2001.

PROCHNOW, L.; RESENDE, A.; JUNIOR, A.; FRANCISCO, E.; CASARIN, V.; PAVINATO P. Phosphorus placement for annual crops in the tropics. **Better Crops**, v.102, n.1, p.21-24, 2018.

QIU, Z. C.; WANG, M.; LAI, W. L.; HE, F. H.; CHEN, Z. H. Plant growth and nutrient removal in constructed monoculture and mixed wetlands related to stubble attributes. **Hydrobiologia**, v.661, n.1, p.251-260, 2010.

RAGHOTHAMA, K. G. Phosphate acquisition. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.50, p.665-693, 1999.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343p.

REIJNDERS, L. Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v.934, p.32-49, 2014.

REIS, T. H. P. **Adubação fosfatada em doses elevadas para o cafeeiro**: impactos na disponibilidade, frações de fósforo e na produtividade. 2012. 138 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

RENÉ, P. J. J. R.; HEINEN, M.; DIMKPA, C. O.; BINDRABAN, P. S. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.48, n.16, 1895-1920, 2017.

RHAGHOTHAMA, K. G. Phosphate acquisition. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.50, p.665-693, 1999.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, n.15-16, p.2339-2354, 2003.

RHEINHEIMER, D. S.; FORNARI, M. R.; BASTOS, M. C.; FERNANDES, G.; SANTANNA, M. A.; CALEGARI, A.; CANALLI, L. B. S.; CANER, L.; LABANOWSKI, J.; TIECHER, T. Phosphorus distribution after three decades of different soil management and cover crops in subtropical region. **Soil and Tillage Research**, v.192, p.33-41, 2019.

RICHARDSON, A. E. Soil micro-organisms and phosphorus availability. In: PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R.; GRACE, P. R. (Eds.). **Soil Biota Management in Sustainable Farming Systems**. CSIRO Publishing, Canberra, ACT, Australia, 1994, pp. 50-62.

RICHARDSON, A. E.; HOCKING, P. J.; SIMPSON, R. J.; GEORGE, T. S. Plant mechanisms to optimize access to soil phosphorus. **Crop and Pasture Science**, v.60, n.2, p.124-143, 2009.

RICHARDSON, A. E.; LYNCH, J. P.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E.; SMITH, F. A.; SMITH, S. E.; HARVEY, P. R.; RYAN, M. H.; VENEKLAAS, E. J.; LAMBERS, H.; OBERSON, A.; CULVENOR, R. A.; SIMPSON, R. J. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of Agriculture. **Plant and Soil**, v.349, n.1-2, p.121-156, 2011.

RICHARDSON, A. E.; SIMPSON, R. J. Soil Microorganisms Mediating Phosphorus Availability. **Plant Physiology**, v.156, p.989-996, 2011.

RIEDER, J. H. Destinação racional dos jazimentos fosfáticos nacionais. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 1986, Brasília. **Anais...** São Paulo: IBRAFOS, 1986. cap. 3, p. 135-172.

RIGO, A. Z.; CORRÊA, J. C.; MAFRA, Á. L.; HENTZ, P.; GROHSKOPF, M. A.; GATIBONI, L. C.; BEDENDO, G. Phosphorus Fractions in Soil with Organic and Mineral Fertilization in Integrated Crop-Livestock System. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.43, p.1-15, 2019.

RITA, J. C. O.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; ZAIA, F. C.; NUNES, D. A. D. 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**, v.37, p.1207-1215, 2013.

ROBERTS, T. L.; STEWART, W. M. Inorganic phosphorus and potassium production and reserves. **Better Crops**, v.86, n.2, p.6-7, 2002.

ROCHA JUNIOR, P. R.; RIBEIRO, P. H.; MESQUITA, L. F.; ANDRADE, F. V.; MENDONÇA E. S. Distribution of C and inorganic phosphorus fractions in different aggregate sizes under forestry, agroforestry system and pasture. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.18, n.2, p.361-375, 2018.

RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S.; WITHERS, P. J. A.; TELES, A. P. B.; HERRERA, W. F. B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the Total Environment**, v.542, p.1050-1061, 2016.

ROSEMARIN, A.; EKANE, N. The governance gap surrounding phosphorus. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.104, n.3, p.265-279, 2016.

ROSSET, J. S.; COELHO, G. F.; GRECO, M.; STREY, L.; JUNIOR, A. C. G. Agricultura convencional versus sistemas agroecológicos: modelos, impactos, avaliação da qualidade e perspectivas. **Scientia Agraria Paranaensis**, v.13, n.2, p.80-94, 2014.

ROY, S. S.; MAHMOOD, R.; NIYOGI, D.; LEI, M.; FOSTER, S. A.; HUBBARD, K. G.; DOUGLAS, E.; SR, R. P. Impacts of the agricultural Green Revolution–induced land use changes on air temperatures in India. **Journal of Geophysical Research**, v.112, e21108, 2007.

RUTTENBERG, K. C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. **Limnology and Oceanography**, v.37, n.7, p.1460-1482, 1992.

SALCEDO, I. H. Biogeoquímica do fósforo em solos da região semi-árida do NE do Brasil. **Revista de Geografia**, v.23, n.3, p.159-184, 2006.

SAMPAIO, M. S. Avaliação do comportamento da variabilidade espacial do fósforo remanescente no solo de lavoura cafeeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 15., Curitiba, 2011. **Anais...** Curitiba, INPE, 2011. p.9203-9210.

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

SANTOS, J. Z. L.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Frações de fósforo em solo adubado com Fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.705-714, 2008b.

SANTOS, V. R.; MOURA FILHO, G.; SANTOS, C. G.; SANTOS, M. A. L.; CUNHA, J. L. X. L. Contribuição de argilominerais e da matéria orgânica na CTC dos solos do estado de Alagoas. **Revista Caatinga**, v.22, n.1, p.27-36, 2009.

SATTARI, S. Z.; BOUWMAN, A. F.; GILLER, K. E.; VAN ITTERSUM, M. K. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.109, n.16, p.6348-6353, 2012.

SCHACHTMAN, D. P.; REID, R. J.; AYLING, S. M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Plant Physiology**, v.116, p.447-453, 1998.

SCHEERER, U.; TRUBE, N.; NETZER, F.; RENNENBERG, H.; HERSCHBACH, C. ATP as Phosphorus and Nitrogen Source for Nutrient Uptake by *Fagus sylvatica* and *Populus x canescens* Roots. **Frontiers in Plant Science**, v.10, p.1-15, 2019.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BALBINOT JR.; A. A.; BATISTELA, O. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico aluminico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: II. Perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.437-447, 2000.

SCHMIDT, J. P.; BUOL, S. W.; KAMPRATH, E. J. Soil phosphorus dynamics during 17 years of continuous cultivation: a method to estimate long-term P availability. **Geoderma**, v. 78, n. 1-2, p. 59-70, 1997.

SCHOLZ, R. W.; ROY, A. H.; BRAND, F. S.; HELLUMS, D. T.; ULRICH, A. E. **Sustainable phosphorus management: A global transdisciplinary roadmap**. Berlin: Springer, 2014.

SCHOLZ, R. W.; ULRICH, A. E.; EILITTÄ, M.; ROY, A. Sustainable use of phosphorus: A finite resource. **Science of The Total Environment**, v.461-462, p.799-803, 2013.

SCHONINGER, E.; GATIBOI, L. C.; ERNANI, P. R. Rhizosphere pH and phosphorus forms in an Oxisol cultivated with soybean, brachiaria grass, millet and sorghum. **Scientia Agricola**, v.69, p.259-264, 2012.

SCHOUMANS, O. F.; BOURAOUI, F.; KABBE, C.; OENEMA, O.; VAN DIJK, K. C. Phosphorus management in Europe in a changing world. **Ambio**, v.44, Suplemento 2, p.180-192, 2015.

SCHRÖDER, J. J.; SMIT, A. L.; CORDELL, D.; ROSEMARIN, A. Improved phosphorus use efficiency in agriculture: A key requirement for its sustainable use. **Chemosphere**, v.84, n.6, p.822-831, 2011.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v.156, p.779-1005, 2011.

SILVA, F. C.; RAIJ, B. van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.2, p.267-288, 1999.

SILVA, G. F.; SANTOS, D.; SILVA, A. P.; SOUZA, J. D. Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do agreste paraibano. **Revista Caatinga**, v.28, n.3, p.25-35, 2015.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V.H.; FERNANDES, N.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L., eds. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.275-374.

SILVA JÚNIOR, J. F.; PEREIRA, G. T.; CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J. Métodos geoestatísticos na modelagem espacial do diâmetro médio do cristal da goethita. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.11, p.1127-1134, 2013.

SILVA, M. A.; NÓBREGA, J. C. A.; CURI, N.; SIQUEIRA, J. O.; MELO MARQUES, J. J. G. S. MOTTA, P. E. F. Frações de fósforo em Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 10, p. 1197-1207, 2003.

SILVA, M. R.; HAYASHI, C. R. M.; HAYASHI, M. C. P. I. Análise bibliométrica e cientométrica: desafios para os especialistas que atuam no campo. **InCID: Revista de Ciência da Informação e Documentação**, v.2, n.1, p.110-129,2011.

SILVA, S. A.; SOUZA LIMA, J. S.; SOUZA, G. S.; OLIVEIRA, R. B.; SILVA, A. F. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 41, n. 01, p. 1-8, 2010.

SIMPSON, R. J.; OBERSON, A.; CULVENOR, R. A.; RYAN, M. H.; LAMBERS, H.; LYNCH, J. P.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E.; SMITH, F. A.; HARVEY, P. R.; RICHARDSON, A.E. Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. **Plant and Soil**, v.349, n.1-2, p.89-120, 2011.

SIMS, J. T.; SHARPLEY, A. N. (Eds.) **Phosphorus: agriculture and the environment**. Soil Science Society of America, Madison, p. 1121. 2005

SINSABAUGH, R. L.; LAUBER, C. L.; WEINTRAUB, M. N.; AHMED, B.; ALLISON, S. D.; CRENSHAW, C.; CONTOSTA, A. R. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. **Ecology Letters**, v.11, p.1252-1264, 2008.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, v.67, p.203-211, 2008.

SMITH, F. W. The phosphate uptake mechanism. **Plant and Soil**, v.245, n.1, p.105-114, 2002.

SOARES, P. B.; CARNEIRO, T. C. J.; CALMON, J. L.; CASTRO, L. O. C. O. Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações

na base de dados Web of Science. **Ambiente Construído**, v.16, n.1, p.175-185, 2016.

SOMMERS, L. E.; HARRIS, L. F.; WILLIAMS, J. D. H.; ARMSTRONG, D. E.; SYERS, J.K. Fractionation of organic phosphorus in lake sediments. **Soil Science Society of America Journal**, v.36, n.1, p.51-54, 1972.

SOUZA, E. C. A.; YASUDA, M. Uso agronômico do termofosfato no Brasil. In: **Fertilizantes: Agroindústria e Sustentabilidade**. LOUREIRO, L.F.E.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Eds.). CETEM/MCTI: Rio de Janeiro, p.547-571, 2009.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A. Variabilidade espacial do fósforo, potássio e da necessidade de calagem numa área sob pastagem. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 03, p. 384-391, 2008.

SOUZA, K. S.; OLIVEIRA, F. A.; GUEDES FILHO, D. H.; NETO, J. F. B. Avaliação dos componentes de produção da mamoneira em função de doses de calcário e fósforo. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 4, p. 116-122, 2009.

SOUZA, L. H.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; VILLANI, E. M. A. Efeito do pH do solo rizosférico e não rizosférico de plantas de soja inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* na absorção de boro, cobre, ferro, manganês e zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.5, p.1641-1652, 2010.

SOUZA, R. F. de.; FAQUIN, V.; FERNANDES, L. A.; AVILA, F. W. Nutrição fosfatada e rendimento do feijoeiro sob influência da calagem e adubação orgânica. **Ciência e Agrotecnologia**, v.30, n.4, p.656-664, 2006.

SPOHN, M.; ERMAK, A.; KUZYAKOV, Y. Microbial gross organic phosphorus mineralization can be stimulated by root exudates – A ³³P isotopic dilution study. **Soil Biology and Biochemistry**, v.65, p.254-263, 2013.

STAUFFER, E.; ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; DONAGEMMA, G. K. Enhanced efficiency phosphate fertilizers and phosphorus availability in Acrudox. **Australian Journal of Crop Science**, v.13, n.1, p.61-68, 2019.

STEFFEN, W.; RICHARDSON, K.; ROCKSTRÖM, J.; CORNELL, S. E.; FETZER, I.; BENNETT, E. M.; BIGGS, R.; CARPENTER, S. R.; VRIES, W.; WIT, C. A.; FOLKE, C.; GERTEN, D.; HEINKE, J.; MACE, G. M.; PERSSON, L. M.; RAMANATHAN, V.; REYERS, B.; SÖRLIN, S. S. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Science**, v.347, n.6223, p.1259855, 2015.

STEIDINGER, B. S.; TURNER, B. L.; CORRALES, A.; DALLING, J. W. Variability in potential to exploit different soil organic phosphorus compounds among tropical montane tree species. **Functional Ecology**, v.29, n.1, p.121-130, 2015.

STOCKDALE, E. A.; LAMPKIN, N. H.; HOVI, M.; KEATING, R.; LENNARTSSON, E. K. M.; MACDONALD, D.W.; PADEL, S.; TATTERSALL, F. H.; WOLFE, M. S.; WATSON, C. A. Agronomic and environmental implications of organic farming systems. **Advances in Agronomy**, v.70, p.261-262, 2001.

SVANBÄCK, A.; McKRACKIN, M. L.; SWANEY, D. P.; LINEFUR, H.; GUSTAFSSON, B. G.; HOWARTH, R. W.; HUMBORG, C. Reducing agricultural nutrient surpluses in a large catchment – Links to livestock density. **Science of The Total Environment**, v.648, p.1549-1559, 2019.

SVERDRUP, H. U.; RAGNARSDOTTIR, K. V. Challenging the planetary boundaries II: Assessing the sustainable global population and phosphate supply, using a systems dynamics assessment model. **Applied Geochemistry**, v.26, p.307-310, 2011.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. A.; CURTIN, D. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorous use**. Reconciling changing concepts of soil phosphorous behavior with agronomic information (Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome), p.110, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TARAFDAR, J. C.; YADAV, R. S.; MEENA, S. C. Comparative efficiency of acid phosphatase originated from plant and fungal sources. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.164, p.279-282, 2001.

TEIXEIRA, R. S.; SILVA, I. R.; SOUSA, R. N.; MATTIELLO, E. M.; SOARES, E. M. B. Organic acid coated-slow-release phosphorus fertilizers improve P availability and maize growth in a tropical soil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.16, n.2, p.1097-1112, 2016.

TELES, A. B. P.; RODRIGUES, M.; BEJARANO HERRERA, W. F.; SOLTANGHEISI, A.; SARTOR, L. R.; WITHERS, P. J. A.; PAVINATO, P. S. Do cover crops change the lability of phosphorus in a clayey subtropical soil under different phosphate fertilizers? **Soil Use and Management**, v.33, n.1, p.34-44, 2017.

TENG, Z.; ZHU, Y.; LI, M.; WHELAN, M. J. Microbial community composition and activity controls phosphorus transformation in rhizosphere soils of the Yeyahu Wetland in Beijing, China. **Science of the Total Environment**, v.628-629, p.1266-1277, 2018.

THIEN, S. J.; MYERS, R. Determination of bioavailable phosphorus in soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.814-818, 1992.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D. S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil and Tillage Research**, v.124, n.57-67, 2012.

TIESSEN, H., BALLESTTER, M. V., SALCEDO, I. Phosphorus and global change. In: BÜNEMANN, E. K., OBERSON, A., FROSSARD, E. **Phosphorus in Action**, Vol. 100, Soil Biology, Springer Berlin Heidelberg, p.459-471, 2011.

TIESSEN, H.; MOIR, J. O. Characterization of Available P by Sequential Extraction, In: CARTER, M. R. (Ed.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**. Lewis Publishers, Boca Raton, 1993, pp. 75-86.

TIESSEN, H., STEWART, J. W. B., OBERSON, A. 1994. Innovative soil phosphorus availability indices: Assessing organic phosphorus. In: **Soil Testing: Prospects for Improving Nutrient Recommendations**, SSSA Special Publication 40, 1994, p.143-162.

TOAMA, H. Z. World phosphate industry. **Iraqi Bulletin of Geology and Mining**, Special Issue, n.7, p.5-33, 2017.

TOKURA, M. A.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C. H.; ALOVISI, A. A. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.10, p.1467-1476, 2002.

TOLLEFSON, J. The global farm. **Nature**, v.466, p.454-456, 2010.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v. 38, p. 45-94, 1985.

TRAN, H. T.; HURLEY, B. A.; PLAXTONA, W. C. Feeding hungry plants: the role of purple acid phosphatases in phosphate nutrition. **Plant Science**, v.179, n.1-2, p.14-27, 2010.

TRIPATHI, D. K.; SINGH, V. P.; CHAUHAN, D. K.; PRASAD, S. M.; DUBEY, N. K. Role of macronutrients in plant growth and acclimation: recent advances and future prospective. In: AHMAD, P.; WANI, M. R.; AZOOZ, M. M.; L-SP, T., editors. **Improvement of crops in the era of climatic changes**. New York: Springer; 2014. pp. 197-216.

TURNER, B. L.; CADE-MENUN, B. J.; CONDRON, L. M.; NEWMAN, S. Extraction of soil organic phosphorus. **Talanta**, v.66, p.294-306, 2005.

TURNER, B. L.; CHEESMAN, A. W.; CONDRON, L. M.; REITZEL, K.; RICHARDSON, A. E. Introduction to the special issue: Developments in soil organic phosphorus cycling in natural and agricultural ecosystems. **Geoderma**, v.257-258, p.1-3, 2015.

TURNER, B. L.; ENGELBRECHT, B. M. J. Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests. **Biogeochemistry**, v.103, n.1-3, 297-315, 2011.

TURNER, B. L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. S. **Organic Phosphorus in the Environment**. CAB International, Wallingford, UK, 2004.

TURNER, B. L.; MAHIEU, N.; CONDRON, L. M. The phosphorus composition of temperate pasture soils determined by NaOH-EDTA extraction and solution ³¹P NMR spectroscopy. **Organic Geochemistry**, v.34, n.8, p.1199-1210, 2003.

TURNER, B. L.; PAPHÁZY, M. J.; HAYGARTH, P. M.; McKELVIE, I. D. Inositol phosphates in the environment. **Philosophical Transactions B**, v.347, n.1420, p.449-469, 2002.

TURNER, B. L.; RICHARDSON, A. E.; MULLANEY, E. J. **Inositol phosphates: linking agriculture and the environment**. CAB International, Wallingford, UK, p.304, 2007.

TURNER, B. L.; WRIGHT, S. J. The response of microbial biomass and hydrolytic enzymes to a decade of nitrogen, phosphorus, and potassium addition in a lowland tropical rain forest. **Biogeochemistry**, v.117, p.115-130, 2014.

USGS. **Mineral commodity summaries**. Digital Data Series DDS-37, US Geological Survey, 2008.

ULRICH, E. A.; FROSSARD, E. On the history of a reoccurring concept: Phosphorus scarcity. **Science of the Total Environment**, v.490, p.694-707, 2014.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v.84, n.2, p.523-538, 2010.

VAN ECK, V. T. M. Forms of phosphorus in particulate matter from the Hollands Diep/Haringvliet, The Netherlands. **Hydrobiologia**, v.91, p.665-681, 1982.

VAN KAUWENBERGH, S. J.; STEWART, M.; MIKKELSEN, R. World reserves of phosphate rock: a dynamic and unfolding story. **Better Crops Plant Food**, v.97, n.3, p.18-20, 2013.

VAN VUUREN, D. P.; BOUWMAN, A. F.; BELSEN, A. H. W. Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion. **Global Environmental Change**, v.20, n.3, p.428-439, 2010.

VARELA, M. F.; BARRACO, M.; GILI, A.; TABOADA, M. A.; RUBIO, G. Biomass decomposition and phosphorus release from residues of cover crops under no-tillage. **Agronomy Journal**, v.109, n.1, p.317-326, 2017.

VARGAS, R. A.; VANZ, S. A. S. A produção científica do Rio Grande do Sul em ciências agrárias representada na base *Web of Science*. **Ciência Rural**, v.44, n.5, p.950-956, 2014.

VENTURA, M. V. A.; BESSA, M. M.; ALVES, L. S.; CHAGAS, P. C. S.; COSTA, E. M.; ARANTES, B. H. T. Agroecologia e agricultura ecológica como pilar de sustentação da agricultura camponesa. **Multi-Science Journal**, v.1, n.12, p.13-16, 2018.

VENDRAME, P. R.; BRITO, O. R.; GUIMARÃES, M. F.; MARTINS, E. S.; BECQUER, T. Fertility and acidity status of latossolos (oxisols) under pasture in the Brazilian Cerrado. **Anais de Academia Brasileira de Ciências**, v.82, n.4, p.1085-1094, 2010.

VERMA, S.; SUBEHIA, S. K.; SHARMA, S.P. Phosphorus fractions in an acid soil continuously fertilized with mineral and organic fertilizers. **Biology and Fertility of Soils**, v.41, n.4, p.295-300, 2005.

VIÉGAS, I. J. M.; NAIFF, A. P. M.; CONCEIÇÃO, H. E. O.; LOBATO, A. K. S.; FRAZÃO, D. A. C.; CORDEIRO, R. A. M. Visual symptoms, growth and nutrients of *Alpinia purpurata* plants exposed to N, P, K, Ca, Mg and S deficiencies. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v.9, n.3-4, p.1048-1051, 2011.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.1-53.

VIEIRA, S. R.; GUEDES FILHO, O.; CHIBA, M. K.; CANTARELLA, H. Spatial variability of soil chemical properties after coffee tree removal. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.33, n.5, p.1507-1514, 2009.

VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A.; GREGO, C. R. Aplicações de geoestatística em pesquisas com cana-de-açúcar. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELLOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Eds). **Cana de açúcar**. 1 ed. Ribeirão Preto: Instituto Agrônomo, v.1, 2008, p.839-852.

VILAR, C. C.; VILAR, F. C. M. Comportamento do fósforo em solo e planta. **Campo Digital: Revista de Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias**, v.8, n.2, p.37-44, 2013.

VINCENT, A. G.; TURNER, B. L.; TANNER, E. V. J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist Forest. **European Journal Soil Science**, v.61, p.48-57, 2010.

VITTI, G. C.; WIT, A.; FERNANDES, B. E. P. Eficiência agrônômica dos termofosfatos e fosfatos alternativos. In: SIMPÓSIO FÓSFORO NA AGRICULTURABRASILEIRA, 2003, São Pedro. **Anais...** São Pedro: Potafos; ANDA, 2003. 726p.

WEBLEY, D. M.; JONES, D. Biological transformation of microbial residues in soil. In: MCLAREN, A. D.; SKUJINS, J. (Eds). **Soil Biochemistry**. Vol. 2, 446-485, 1971. New York: Marcel Dekker.

WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R.; BENITES, V. D. M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 2537, 2018.

WEI, K.; SUN, T.; TIAN, J.; CHEN, Z.; CHEN, L. Soil microbial biomass, phosphatase and their relationships with phosphorus turnover under mixed inorganic and organic nitrogen addition in a *Larix gmelinii* plantation. **Forest Ecology and Management**, v.422, p.313-322, 2018.

WITHERS, P. J. A.; VAN DIJK, K. C.; NESET, T. S. S.; NESME, T.; OENEMA, O.; RUBAEK, G. H.; SCHOUMANS, O. F.; SMIT, B.; PELLERIN, S. Stewardship to tackle global phosphorus inefficiency: The case of Europe. **Ambio**, v.44, Suplemento 2, p.193-206, 2015.

WHITE, P. J.; BROWN, P. H. Plant nutrition for sustainable development and global health. **Annals of Botany**, v.105, n.7, n.1073-1080, 2010.

WHITE, P. J. **Ion uptake mechanisms of individual cells and roots**: short-distance transport P. Marschner (Ed.), Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants, Academic Press, London, 2012, p.7-47.

WILLY, D. K.; MUYANGA, M.; MBUVI, J.; JAYNE, T. The effect of land use change on soil fertility parameters in densely populated areas of Kenya. **Geoderma**, v.343, p. 254-262, 2019.

XAVIER, F. A. S.; ALMEIDA, E. F.; IRENE, M. C.; MENDONÇA, E. S. Soil phosphorus distribution in sequentially extracted fractions in tropical coffee-agroecosystems in the Atlantic Forest biome, Southeastern Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.89, p.31-34, 2011.

XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S. Phosphorus fractionation in a sandy soil under organic agriculture in Northeastern Brazil. **Geoderma**, v.151, n.3-4, p.417-423, 2009.

YANG, W.; HAO, F.; CHENG, H.; LIN, C.; OUYANG, W. Phosphorus Fractions and Availability in an Albic Bleached Meadow Soil. **Agronomy Journal**, v.105, n.5, p.1451-1457, 2013.

YANG, X.; CHEN, X.; YANG, X. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. **Soil and Tillage Research**, v.187, p.85-91, 2019.

YEVDOKIMOV, I.; LARIONOVA, A.; BLAGODATSKAYA, E. Microbial immobilisation of phosphorus in soils exposed to drying-rewetting and freeze-thawing cycles. **Biology and Fertility of Soils**, v.52, n.5, p.685-696, 2016.

ZAIA, F. C. **Frações de fósforo do solo sob diferentes coberturas vegetais no norte fluminense e em plantios de cacau no sul da Bahia**. 2005. 89 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2005.

ZAIA, C. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F. Formas de fósforo no solo sob leguminosas florestais, floresta secundária e pastagem no norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.3, p.1191-1197, 2008.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; ZANÃO, M. P. C.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um Latossolo em sistema de plantio direto. **Revista Ceres**, v. 57, p. 429-438, 2010.

ZAVIŠIĆ, A.; NASSAL, P.; YANG, N.; HEUCK, C.; SPOHN, M.; MARHAN, S. Phosphorus availabilities in beech (*Fagus sylvatica* L.) forests impose habitat filtering on ectomycorrhizal communities and impact tree nutrition. **Soil Biology and Biochemistry**, v.98, p.127-137, 2016.

ZHANG, W.; RICKETTS, T. H.; KREMEN, C.; CARNEY, K.; SWINTON, S. M. Ecosystem services and dis-services to agriculture. **Ecological Economics**, v.64, n.2, p.253-260, 2007.

ZONTA, J. H.; BRANDÃO, Z. N.; MEDEIROS, J. C.; SANA, R. S.; SOFIATTI, V. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.6, p.595-602, 2014.

ZUCARELLI, C.; BARZAN, R. R.; SILVA, J. B.; CHAVES, D. P. Associação de fosfatos e inoculação com *Bacillus subtilis* e seu efeito no crescimento e desempenho produtivo do feijoeiro. **Revista Ceres**, v.65, n.2, p.189-195, 2018.

ZHU, J.; LI, M.; WHELAN, M. J. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: a review. **Science of the Total Environment**, v.612, p.522-537, 2018.

4 CAPÍTULO II

VARIABILIDADE ESPACIAL DAS FORMAS DE FÓSFORO EM SOLO SOB MANEJO CONSERVACIONISTA

4.1 RESUMO

O fósforo (P) está entre os elementos mais importantes no desenvolvimento das plantas. Contudo, o elemento possui forte tendência de reagir com componentes do solo, adsorvendo aos colóides ou formando compostos de baixa solubilidade, tornando-se indisponível às culturas. Diversos fatores podem afetar a dinâmica e distribuição espacial do P no solo, inclusive, o sistema de manejo adotado. O presente trabalho tem como objetivo estudar a variabilidade espacial das formas orgânicas e inorgânicas de P em solo sob sistema conservacionista de manejo. A área estudada é constituída de um módulo experimental de produção orgânica de hortaliças, com fertilização exclusivamente a base de fontes vegetais. Foram coletadas amostras de solo em 72 pontos da área, com grade de pontos a cada 10 metros. As amostragens ocorreram em cinco profundidades: 0-0,05 m; 0,05-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, totalizando 360 amostras. Foram extraídas as frações lábil, moderadamente lábil e moderadamente resistente das formas inorgânicas e orgânicas de P, além da fração P residual, P orgânico total e P total. Além disso, foram determinados alguns atributos químicos e físicos do solo (análises de rotina de fertilidade e granulométrica) e P remanescente, visando avaliar a influência destes na distribuição das formas de P na área. Os resultados indicam que o manejo adotado, aliado às características inerentes ao solo da área, influencia a variabilidade espacial das frações orgânicas e inorgânicas de P, principalmente as menos estáveis (lábil e moderadamente lábil). A forma inorgânica teve maior participação no P total do solo, exceto na profundidade 0,20-0,40 m, em que o P orgânico foi mais expressivo. As formas inorgânicas e orgânicas de P moderadamente lábil se acumulam no solo de maneira mais expressiva. Por outro lado, a fração moderadamente resistente de P orgânico apresenta menor participação no P total do solo. A distribuição espacial das formas de P na área evidencia que a adubação com P deve ser realizada considerando zonas de manejo, evitando assim que áreas com pouca necessidade de P recebam as mesmas quantidades que as com deficiência. As informações contidas neste estudo podem ser usadas para otimizar as aplicações de fertilizantes contendo P, aumentando a produtividade das culturas, reduzindo os custos e os possíveis problemas ambientais advindos de práticas inadequadas de fertilização.

Palavras-chave: Fertilidade do solo. Manejo sustentável. Reciclagem de fósforo. Fósforo orgânico.

4.2 ABSTRACT

Phosphorus (P) is among the most important elements in the development of plants. However, the element has a strong tendency to react with soil components, adsorbing to colloids or forming compounds of low solubility, becoming unavailable to crops. Several factors can affect the dynamics and spatial distribution of P in the soil, including the management system adopted. The present work aims to study the spatial variability of organic and inorganic forms of P in soil under conservation management system. The studied area consists of an experimental module for organic vegetable production, with fertilization exclusively based on vegetable sources. Soil samples were collected at 72 points in the area, with a grid of points every 10 meters. Sampling took place at five depths: 0-0.05 m; 0.05-0.10 m; 0.10-0.20 m; 0.20-0.40 m and 0.40-0.60 m, totaling 360 samples. The labile, moderately labile and moderately resistant fractions were extracted from the inorganic and organic forms of P, in addition to the residual P fraction, total organic P and total P. In addition, some chemical and physical attributes of the soil (routine fertility and particle size analyzes) and remaining P were determined in order to assess their influence on the distribution of P forms in the area. The results indicate that the adopted management, allied to the characteristics inherent to the soil of the area, influences the spatial variability of the organic and inorganic fractions of P, mainly the less stable ones (labile and moderately labile). The inorganic form had a greater participation in the total P of the soil, except in the depth of 0.20-0.40 m, in which the organic P was more expressive. The inorganic and organic forms of moderately labile P accumulate in the soil in a more expressive way. On the other hand, the moderately resistant fraction of organic P has less participation in the total P of the soil. The spatial distribution of P forms in the area shows that fertilization with P must be carried out considering management areas, thus avoiding that areas with little need for P receive the same quantities as those with deficiency. The information contained in this study can be used to optimize the applications of fertilizers containing P, increasing the productivity of crops, reducing costs and possible environmental problems arising from inadequate fertilization practices.

Keywords: Soil fertility. Sustainable management. Phosphorus recycling. Organic phosphorus.

4.3 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é essencial à vida e à produção de alimentos (CHOJNACKA et al., 2020), sendo um dos nutrientes mais limitantes para as culturas (GATIBONI et al., 2021). No solo, o P possui propriedades únicas, como baixa solubilidade e alta fixação por partículas do solo (XOMPHOUTHEB et al., 2020). A fixação significativa e sua precipitação como fosfatos de ferro e alumínio são muito comuns em solos ácidos intensamente intemperizados (KIFLU et al., 2017), deixando apenas uma pequena fração de P disponível para as plantas (GATIBONI et al., 2021).

Como resultado, uma grande quantidade de fertilizantes inorgânicos de P tem sido aplicada para sustentar os sistemas de produção agrícola (ALI et al., 2019), causando um acúmulo líquido de P no solo (LU et al., 2020; PAVINATO et al., 2020) e potenciais riscos ambientais (ZHANG et al., 2021), enquanto seus depósitos se tornam escassos (SVANBÄCK et al., 2019). Este cenário tem gerado inúmeras preocupações a respeito da sustentabilidade do P (ROWE et al. 2016; FORNARA et al., 2020; BROWNLIE et al., 2021), uma vez que se trata de um recurso finito, não substituível, não renovável e geograficamente restrito (SHEN et al., 2019).

A química do P do solo é complexa, com numerosas formas de P presentes e passíveis de transformações dependendo do ambiente físico, químico e biológico (KIFLU et al., 2017). Estas múltiplas formas diferem em sua disponibilidade para absorção pelas plantas (HOU et al., 2014). Assim, uma investigação detalhada da dinâmica e da biodisponibilidade do P requer a separação e identificação das diferentes formas de P nos solos (CONDRON; NEWMAN, 2011).

O P pode ser identificado como ocorrendo em duas formas químicas: P inorgânico (Pi), que inclui ânions ortofosfato em solução, minerais ortofosfato e ortofosfato adsorvido por superfícies minerais e matéria orgânica (MOS), e P orgânico (Po), em que os átomos de P estão covalentemente ligados ao carbono (MAcLAREN et al., 2020). Abrange a biomassa microbiana do solo e os compostos de decomposição da MOS de recalcitrância variável, incluindo fosfomonoésteres, fosfodiésteres e polifosfatos orgânicos, podendo compreender >50% do P total do solo em sistemas agrícolas dependendo da localização, tipo de solo e uso da terra (NASH et al., 2014). Po é considerado de particular importância em solos tropicais (LIN et al., 2020), pois sua ciclagem é crucial quando as reservas de Pi do solo estão em quantidades inadequadas (BAYUELO-JIMÉNEZ et al., 2020).

A mudança no uso da terra e o manejo agrícola podem afetar consideravelmente as formas de P no solo (STUTTER et al., 2015; MARANGUIT et al., 2017; BAYUELO-JIMÉNEZ et al., 2020; FU et al., 2021). Por exemplo, sistemas conservacionistas aumentam significativamente as diferentes frações de P (MAHARJAN et al., 2018; RECENA et al., 2018). Um dos principais impulsionadores das melhorias observadas em solos sob manejo conservacionista é a maior MOS (PAGE et al., 2020), que desempenha um papel fundamental na manutenção das reservas de P (MAHARJAN et al., 2018), uma vez que afeta sua adsorção-desorção no solo através de diferentes mecanismos (YANG et al., 2019).

As frações de Po dependem de aportes de MOS (XAVIER et al., 2009). Po pode ser convertido em Pi biodisponível quando é mineralizado (FU et al., 2021), fornecendo uma fonte de P de liberação lenta de longo prazo para plantas e organismos do solo (MALIK et al., 2012). Além disso, o P mantido em formas orgânicas pode ser mais bem protegido de perda por fixação (PHIRI et al., 2001). Portanto, sistemas de manejo que promovem a adição de MOS podem alterar a dinâmica do P (RIGO et al., 2019) e aumentar a sustentabilidade da produção agrícola, principalmente, em solos tropicais com limitação de P e altamente intemperizados (MARANGUIT et al., 2017).

Além de ser a principal fonte de Po, a MOS é considerada uma fonte de C ou N para os microrganismos do solo (AGUIAR et al., 2013; WU et al., 2020), que regulam a disponibilidade de P por inúmeros processos, como a solubilização do P mineral trocável pela secreção de ácidos orgânicos e inorgânicos (ZHU et al., 2018), decomposição da MOS, imobilização de P em seus tecidos, evitando a adsorção nos colóides inorgânicos do solo (RHEINHEIMER et al., 2019) e transformação de P orgânico em inorgânico catalisada por enzimas fosfatases (WANG et al., 2021). Juntamente com o fato de que as células microbianas dissolvidas são fonte de liberação de P (GU et al., 2017).

A MOS também ocupa locais que podem adsorver P, portanto, inibe sua adsorção por meio de adsorção competitiva (HIRADATE; USHIDA, 2004). Atua também na complexação de metais de superfície e liberação destes em solução, removendo locais de adsorção de P, aumentando assim sua disponibilidade (HUNT et al., 2007; MARGENOT et al., 2017).

Além do incremento da MOS em sistemas conservacionistas, a ciclagem do P nestes sistemas é beneficiada por uma série de melhorias na qualidade do solo em relação às propriedades físicas, químicas e biológicas (PAGE et al., 2020), por exemplo, agregação, umidade, N, pH, CTC e fauna do solo (PAGE et al., 2020, SU et al., 2021), que podem afetar a dinâmica das formas de P nos solos, reduzindo a dependência de fertilizantes fosfatados externos (BAYUELO-JIMÉNEZ et al., 2019; RIGO et al., 2020).

Uma estimativa precisa da distribuição espacial dos nutrientes do solo e uma compreensão dos principais fatores determinantes que influenciam essa distribuição são muito importantes no manejo do solo (ZHANG et al., 2014), e isso é crucial para o P (RINGEVAL et al., 2017), que muitas vezes é aplicado sem considerar sua variabilidade espacial, fazendo com que áreas com pouca necessidade de P recebam as mesmas quantidades que as deficientes (MARQUES JÚNIOR et al., 2008). Segundo Ringeval et al. (2017), numerosos processos conduzem a distribuição espacial de P em solos agrícolas, sendo o sistema de manejo o principal condutor de tal variabilidade.

Compreender os padrões espaciais do P e suas frações é fundamental para o manejo ou utilização eficaz de P e a melhoria da disponibilidade de P nos solos (SUN et al., 2015; WILSON et al., 2016), identificando as áreas que requerem intervenção e o nível em que essas intervenções são necessárias (BOGUNOVIC et al., 2017), desta forma, será possível utilizar P de forma mais eficiente em diferentes sistemas, aplicando o fertilizante no lugar certo (LIN et al., 2020; MEMIAGHE et al., 2021), o que pode melhorar o rendimento das safras, economizar recursos e proteger o meio ambiente (XU et al., 2019).

Diversos estudos têm sido realizados sobre a variabilidade espacial do P do solo (CAMARGO et al., 2013; MOMTAZ et al., 2016; WILSON et al., 2016). A maioria teve como foco o planejamento e o mapeamento do P disponível (MEMIAGHE et al., 2021), que, geralmente, representa apenas uma pequena fração do P total do solo (GATIBONI et al., 2021). Estudar a real disponibilidade de P no solo implica em contabilizar a distribuição espacial das diferentes espécies de P. Contudo, ainda são escassos os estudos sobre a distribuição espacial das diferentes formas de P no solo (WERNER et al., 2017), e, muito menos se sabe sobre os impactos decorrentes de sistemas conservacionistas na dinâmica espacial e biodisponibilidade deste nutriente.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo, avaliar a variabilidade espacial das formas de P em solo sob manejo conservacionista, num sistema integrado de produção agroecológica, com fertilização exclusivamente a base de fontes vegetais.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Descrição da área de estudo

A área de estudo consiste em um módulo experimental de produção orgânica intensiva de hortaliças, localizado no Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA), também conhecido por “Fazendinha Agroecológica”, no município de Seropédica, RJ (coordenadas 22°46' S e 43°41' W, a 33,0 m de altitude). O solo é classificado como Planossolo Háplico Típico, caracterizado pela presença de horizonte E arenoso na camada superficial do solo, seguido por horizonte argiloso, chamado de tabatinga, em profundidade aproximada de 1 metro (PIAN, 2019). O clima da região é classificado como Aw (ALVARES et al., 2013), com predomínio de altas temperaturas no verão e temperaturas amenas no inverno, com média anual de 24,5° C, com chuvas concentradas de novembro a março e uma média anual de 1.213 mm (NEVES et al., 2017). Segundo Mata (2012), o módulo tem uma área total de 1,02 ha e relevo plano. De acordo com a mesma autora, a proposta fundamental do módulo é a produção orgânica intensiva de hortaliças, a qual está vinculada à produção de biomassa vegetal necessária ao manejo do solo e das culturas.

Devido às limitações climáticas no verão, altas temperaturas diurnas e noturnas, existem dois ciclos de produção, sendo um ciclo de outono/inverno com produção diversificada e intensiva de hortaliças e o ciclo de primavera/verão em que são priorizados os plantios de adubos verdes e culturas apropriadas às condições climáticas do período, como o milho e quiabo (PIAN, 2019).

Segundo Pian (2019), o módulo foi implantado em 2010, com a hipótese de que um sistema de cultivo orgânico intensivo de hortaliças, utilizando fertilização de origem vegetal, é sustentável em condições edafoclimáticas da Baixada fluminense. De acordo com a autora, a ênfase foi colocada no cultivo diversificado intensivo de hortaliças, na produção "in situ" de biomassa vegetal, uso de compostos fermentados, compostagem vegetal e agentes alternativos e biológicos para o controle fitossanitário. Além das fontes de fertilização internas (produção in situ), consta o uso de fontes externas, em que as mais utilizadas são o farelo de trigo e de mamona, utilizadas para a produção de composto fermentado utilizado como adubação orgânica de plantio. De acordo com Pian (2019), o produto é obtido pela fermentação anaeróbica de farelo de mamona e farelo de trigo (proporção de 60:40), após inoculação com microrganismos eficientes (EM - produto comercial Embiotic®) e incubação por 21 dias em bombas plásticas. Quando necessárias, são feitas reposições com termofosfato, fosfato reativo de rocha e farinha de osso. Na Tabela 6 estão sumarizadas as espécies cultivadas no módulo experimental, no ano de 2019.

Tabela 6. Cultivos presentes no Módulo de Cultivo Orgânico Intensivo de Hortaliças. Seropédica-RJ, 2019.

Cultivo	Nome científico
abóbora moranga	<i>Curcubita máxima</i> Duchesne
abóbora jacaré	<i>Curcubita moschata</i> Duchesne
alface-americana	<i>Lactuca sativa</i> L., cv. Angelina
alface-crespa	<i>Lactuca sativa</i> L., cv. Vera
alface-crespa vermelha	<i>Lactuca sativa</i> L., cv. Red fire
alface-lisa	<i>Lactuca sativa</i> L., cv. Regina 2000

Continua...

Continuação da Tabela 6.

Cultivo	Nome científico
alface-romana	<i>Lactuca sativa</i> L., cv. Branca de Paris
Almeirão	<i>Lactuca canadensis</i> L.
Banana	<i>Musa paradisiaca</i> L.
batata-doce	<i>Ipomoea batatas</i> L., var. locais
Bertalha	<i>Basella alba</i> L., var. Local
Beterraba	<i>Beta vulgaris</i> L., var. Early Wonder Tall Top
capim elefante	<i>Pennisetum purpureum</i> Schumach., cv. Cameroon
capim limão	<i>Cymbopogon citratus</i> (DC) Stapf.
Capuchinha	<i>Tropaeolum majus</i> L. var. Anã Sortida
Cebolinha	<i>Allium fistulosum</i> L., var. local
Cenoura	<i>Daucus carota</i> L., var. Brasília
Chicória	<i>Cichorium endívia</i> L., cv. Elysee
Coentro	<i>Coriandrum sativum</i> L.
couve	<i>Brassica oleracea</i> L., var. acephala DC.
crotalária juncea	<i>Crotalaria juncea</i> L.
crotalária spectabilis	<i>Crotalaria spectabilis</i> L.
Cúrcuma	<i>Curcuma longa</i> L.
erva-doce	<i>Foeniculum vulgare</i> Mill
feijão de porco	<i>Canavalia ensiformis</i> (L.) DC
feijão fava	<i>Phaseolus lunatus</i> L. cv. rajada vermelha
feijão guandu	<i>Cajanus cajan</i> , L. cv. Mandarin
feijão vagem	<i>Phaseolus vulgaris</i> L., var. Alessa e var. Novirex
Flemingea	<i>Flemingia macrophylla</i> (Willd.) Merr.
Gengibre	<i>Zingiber officinale</i> Roscoe
gergelim preto	<i>Sesamum indicum</i> L.
Gliricídia	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.)
Laranja	<i>Citrus sinensis</i> L.
Manjericão	<i>Ocimum basilicum</i> L.
Milheto	<i>Pennisetum Americanum</i> (L.) K. Schum.
Milho	<i>Zea Mays</i> L., cv. BRS Caatingueiro
Mostarda	<i>Brassica juncea</i> (L.) Czern. & Coss.
mucuna cinza	<i>Mucuna pruriens</i> L.
Nirá	<i>Allium tuberosum</i> Rottl. ex Spreng
ora-pro-nóbis	<i>Pereskia aculeata</i> Mill.
palmeira real	<i>Archontophoenix cunninghamii</i> H. Wendl. & Drude
Pepino	<i>Cucumis sativus</i> , L. var. Racer
pimenta biquinho	<i>Capsicum chinese</i> L.
pimentão chapéu de bispo	<i>Capsicum baccatum</i> var. Local
Quiabo	<i>Abelmoschus esculentus</i> L. Moench
Rabanete	<i>Raphanus sativus</i> L., var. Vip Crimson
Rúcula	<i>Eruca sativa</i> Mill., var. Astro
Salsa	<i>Petroselinum sativum</i> Hoffm, var. Lisa Preferida

Continua...

Continuação da Tabela 6.

Cultivo	Nome científico
Sorgo	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench
Taioba	<i>Xanthosoma taioba</i> E. G. Gonç.
Téfosia	<i>Tefrosia cinapou</i> L.
tomate cereja	<i>Solanum lycopersicun</i> L., var. Cereja, cv. Perinha
capim vetiver	<i>Chrysopogon zizanioides</i> (L.) Roberty
Zínia	<i>Zinnia elegans</i> Jacq

4.4.2 Amostragem do Solo

A amostragem de solo foi realizada em 72 pontos, em cinco profundidades, sendo estas: 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, em um *grid* de 10 x 10 metros, com auxílio de trado holandês. Cada amostra foi composta por três subamostras, formando uma composta. As coordenadas de cada ponto amostral foram definidas com auxílio de um GPS TRIMBLE PRO XT. As amostras de solo coletadas foram devidamente identificadas, secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com malhas de 2 mm, caracterizando terra fina seca ao ar (TFSA). O mapa de localização do município de Seropédica, contendo o grid amostral no módulo está representada na Figura 5.

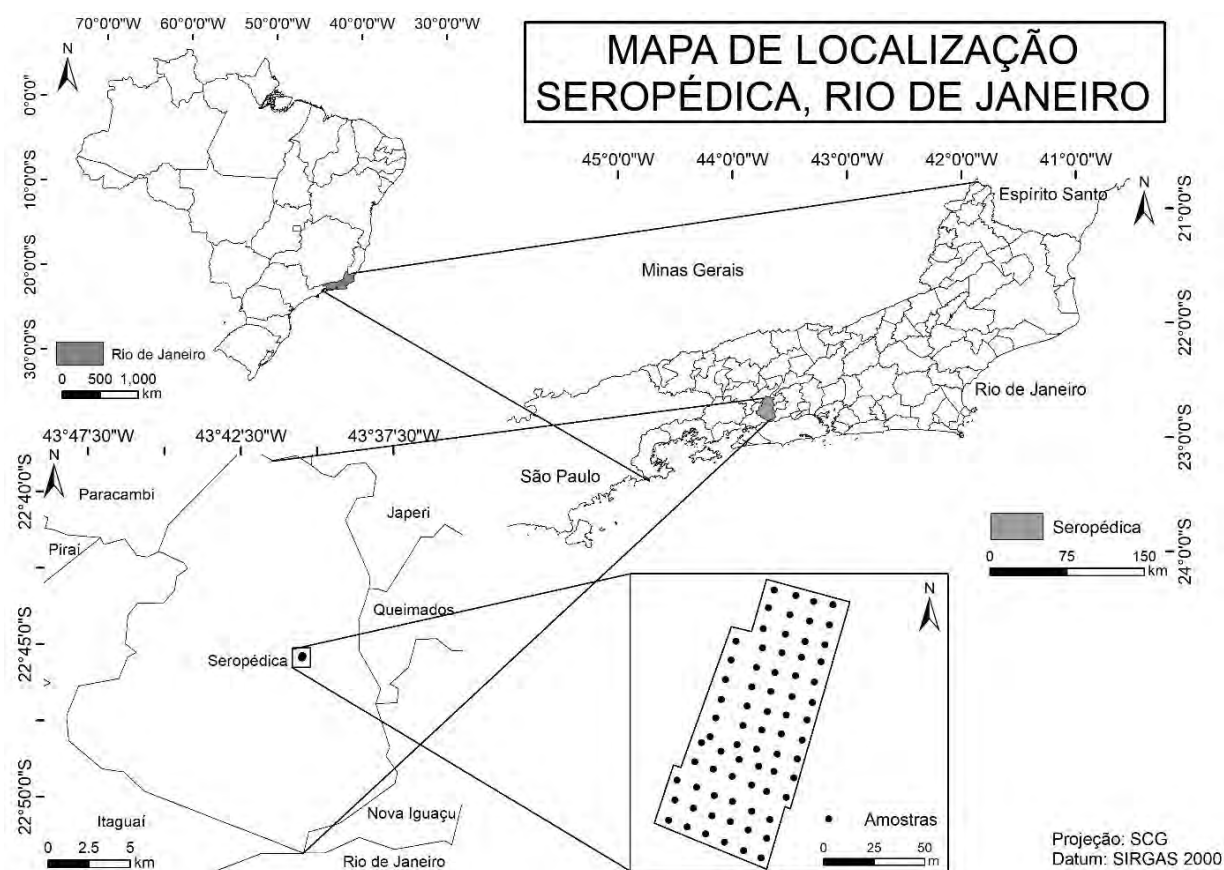


Figura 5. Mapa de localização da área de estudo com destaque para o grid amostral. Seropédica-RJ, 2019.

Para coleta do solo, o módulo experimental foi dividido em três subsistemas, sendo estes: tomate/telado; policultivo e Gliricídia/Capineira. De acordo com descrição de Pian (2019), o subsistema tomate é composto por cultivo de tomate a pleno sol, de março a outubro e cultivo de quiabo ou batata-doce ou adubos verdes de novembro a março, com plantio sem preparo de canteiros, com revolvimento mínimo do solo. Já no telado são cultivadas hortaliças folhosas de março a dezembro, e cultivo de adubos verdes de dezembro a março. Consta preparo manual de canteiros após cada ciclo de hortaliças. A área contém Sombrite, que permite 70% de incidência solar. No subsistema de policultivo são cultivadas hortaliças folhosas, tubérculos, cucurbitáceas e feijões de março a outubro, e cultivo de milho em consórcio com adubos verdes de outubro a março. Consta uso de mecanização para preparo do solo (arado, grade e encanteirador) duas vezes ao ano (março e outubro), e manutenção manual dos canteiros após cada colheita de hortaliça (a pleno sol).

Por fim, a área de Gliricídia/Capineira é composta por linhas de gliricídia, que recebem 3 a 4 podas por ano, e capim elefante, que recebe 3 a 4 cortes por ano, sendo a biomassa vegetal deste sistema destinada à produção de compostagem, cobertura vegetal morta dos canteiros das hortaliças, e consequentemente, para fertilização do agroecossistema (PIAN, 2019).

Na Figura 6 está representada a distribuição dos sistemas no módulo experimental de cultivo orgânico de hortaliças. As características químicas do solo para cada subsistema em cada profundidade de coleta estão sumarizadas na Tabela 7.



Figura 6. Vista aérea do módulo de cultivo orgânico de hortaliças, com destaque para os subsistemas. Polígono amarelo: subsistema tomate/telado; polígono preto: subsistema policultivo e polígono vermelho: Gliricídia/capineira. Fonte: Google Earth, 2020.

Tabela 7. Características químicas do solo no módulo experimental de cultivo orgânico de hortaliças em cada subsistema e nas profundidades de amostragem 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. Seropédica – RJ, 2019.

Área	Na	Ca	Mg	K	H+Al	Al	S	T	V	m	pH água	Corg	P
	Cmolc / dm ⁻³					%					1:2,5	%	mg dm ⁻³
Profundidade 0,0 – 0,05 m													
Tela	0,09	4,78	2,18	0,37	2,19	0,00	7,42	9,60	77,44	0,00	6,57	2,39	521,63
Poli	0,06	3,23	1,60	0,21	2,09	0,00	5,10	7,19	70,81	0,00	6,58	1,39	551,47
G/C	0,10	1,83	1,26	0,10	2,64	0,01	3,28	5,92	55,99	0,32	6,12	1,42	461,44
Média	0,08	3,28	1,68	0,23	2,30	0,00	5,26	7,57	68,08	0,11	6,42	1,73	511,51
Profundidade 0,05 – 0,10 m													
Tela	0,09	4,44	2,12	0,30	4,47	0,00	6,95	11,41	60,99	0,00	6,06	2,62	263,66
Poli	0,09	3,05	1,48	0,20	3,77	0,00	4,83	8,61	56,14	0,00	6,01	2,09	154,69
G/C	0,11	1,58	1,08	0,09	4,59	0,13	2,86	7,44	37,92	5,22	5,37	1,56	73,87
Média	0,10	3,02	1,56	0,20	4,28	0,04	4,88	9,16	51,68	1,74	5,81	2,09	164,08
Profundidade 0,10 – 0,20 m													
Tela	0,07	2,40	1,14	0,17	3,98	0,00	3,78	7,76	48,79	0,00	6,15	1,98	319,96
Poli	0,05	1,51	0,71	0,11	2,44	0,00	2,38	4,82	49,46	0,00	6,35	1,79	163,13
G/C	0,05	0,86	0,37	0,04	3,26	0,20	1,31	4,58	30,38	13,26	5,08	1,71	54,50
Média	0,06	1,59	0,74	0,11	3,23	0,07	2,49	5,72	42,88	4,42	5,86	1,83	179,20
Profundidade 0,20 – 0,40 m													
Tela	0,08	2,91	1,36	0,16	2,38	0,01	4,50	6,88	65,38	0,17	5,98	0,81	108,54
Poli	0,06	1,81	1,10	0,10	1,86	0,00	3,07	4,93	60,94	0,00	6,27	0,45	80,91
G/C	0,04	0,68	0,38	0,04	3,30	0,22	1,14	4,43	26,88	16,19	4,91	0,14	39,80
Média	0,06	1,80	0,95	0,10	2,51	0,08	2,90	5,42	51,06	5,45	5,72	0,47	76,42
Profundidade 0,40 – 0,60 m													
Tela	0,06	2,38	1,62	0,08	2,84	0,03	4,14	6,98	59,10	0,81	5,80	0,14	64,44
Poli	0,05	1,93	1,34	0,10	2,46	0,03	3,43	5,89	59,46	0,73	5,93	0,09	47,04
G/C	0,02	0,68	0,36	0,02	2,14	0,20	1,08	3,22	37,12	12,63	5,10	0,13	36,73
Média	0,05	1,66	1,11	0,07	2,48	0,09	2,89	5,36	51,90	4,72	5,61	0,12	49,40

H+Al = Acidez potencial; S = Soma de Bases; T = Capacidade de troca de cátions; V = Percentagem por saturação de Bases; m = saturação por Alumínio; pH = Potencialhidrogeniônico; Corg = Carbono orgânico; P = Fósforo disponível. Tela = subsistema tomate/telado; Poli = Policultivo e G/C = Gliricídia/Capineira.

4.4.3 Avaliações

a) Fracionamento do P

Para a determinação das frações orgânicas e inorgânicas de P moderadamente lábeis e moderadamente resistentes, utilizou-se o método proposto por Bowman (1989), e, as frações lábeis (extração com bicarbonato de sódio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ à pH 8,5) foram obtidas de acordo com Bowman e Cole (1978), com modificações realizadas por Duda (2000). Para isso, amostras de solo seco ao ar foram submetidas à extração sequencial com Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ pH 8,5 (frações Pi bic e Ptotal bic - lábeis); Ácido Sulfúrico concentrado (H_2SO_4) (frações Pi H e Ptotal H - moderadamente lábeis) e Hidróxido de Sódio (NaOH) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (frações Pi OH e Ptotal OH - moderadamente resistentes).

Na primeira extração (NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ pH 8,5), pesou-se 1,0 g de TFSA em tubos Falcon® com capacidade para 50 mL, e, em seguida, adicionou-se 40 mL da solução de bicarbonato de sódio em cada amostra, que foram levadas para agitador horizontal e agitadas por 16 horas. Após esse período, as amostras foram centrifugadas a 5.000 rpm, por cinco minutos, e o sobrenadante foi transferido para tubos Falcon® limpos. Retirou-se, do sobrenadante, uma alíquota de 20,0 mL, que foi transferida para tubo de ensaio. Após esse procedimento, adicionou-se 2,0 mL de cloreto de magnésio (MgCl_2) saturado e 3,0 mL de ácido perclórico (HClO_4) concentrado (P.A. 72 %) nas amostras, que foram levadas para bloco digestor a temperatura de 200 °C até a formação de um gel incolor (aproximadamente 48 horas de digestão). Posteriormente, após o arrefecimento das amostras, estas foram agitadas, transferidas para tubos Falcon limpos e aferidas para 20 mL. Destas amostras, retirou-se alíquota de 5 mL, sendo adicionado 10 mL de solução de molibdato de amônio e 30 mg de ácido ascórbico, para determinar a concentração de fósforo, com espectrofotômetro na faixa do azul (660 nm) a partir da formação da cor azul do complexo fosfato-molibdato em meio sulfúrico, na presença de ácido ascórbico como redutor (EMBRAPA, 1997). Para a determinação do fósforo no extrato do bicarbonato não digerido (Pi-bic) procedeu-se da mesma forma da determinação no extrato do bicarbonato digerido (Pt-bic).

Na segunda extração, realizada com ácido sulfúrico (H_2SO_4), adicionou-se 1,5 do ácido concentrado nas amostras de solo residual da primeira extração (NaHCO_3), em seguida, adicionou-se 2,0 mL de água destilada. Em seguida, aferiram-se os tubos para 40 mL com água destilada. Posteriormente, com o arrefecimento das amostras, estas foram acondicionadas em centrífuga onde foram centrifugadas a 5.000 rpm por cinco minutos. Em seguida transferiu-se todo o sobrenadante para tubos limpos.

Assim como descrito na primeira extração, uma alíquota de 20 mL do extrato ácido foi adicionada a tubos de ensaio, onde procedeu-se como descrito para a digestão do extrato do bicarbonato. Sendo a determinação da concentração de P semelhante. Contudo, antes da adição da solução de molibdato, ajustou-se o pH das amostras adicionando-se três gotas de p-nitrofenol (0,25 %), e em seguida, solução de NaOH 10 mol L^{-1} , com auxílio de um conta gotas, até obter-se a viragem do incolor para amarelo. Determinou-se a concentração de fósforo (P total H) de acordo com Embrapa (1997). Para a determinação do fósforo no extrato ácido não digerido (P inorgânico H) realizou-se os procedimentos descritos no extrato ácido digerido (P total H).

Na terceira extração, realizada com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, no solo residual da segunda extração (H_2SO_4), adicionou-se 40 mL de solução de NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. Em seguida, os tubos com as amostras foram acondicionados em panela de banho-maria, permanecendo por 2 horas, a uma temperatura de 80 °C. Após esse período, deixou-se arrefecer, e, procedeu-se a centrifugação das amostras a 5.000 rpm por cinco minutos, transferindo o sobrenadante para tubos Falcon limpos. A digestão do extrato do

NaOH foi realizada de maneira semelhante às extrações anteriores, e, a determinação do fósforo no extrato foi feita da mesma forma que para o extrato ácido digerido.

Para a determinação do fósforo no extrato do NaOH não digerido, foi adicionado ácido sulfúrico 20% às amostras com objetivo de baixar o pH das amostras para 1,0 ($\pm 0,1$) (precipitar o ácido húmico, prejudicial à leitura). Após 24 horas, centrifugou-se a 5.000 rpm por 5 minutos. A determinação de P nas amostras foi realizada como descrita para o extrato ácido digerido.

Posterior às extrações supracitadas, o solo remanescente foi seco em estufa a 60 °C, durante 48 horas, e submetido à digestão com HClO_4 (ácido perclórico) + MgCl_2 (cloreto de magnésio) para determinação da fração P Residual. O conteúdo das formas de P orgânico das amostras foi estimado a partir da diferença entre o P total (digerido) de cada fração e o P inorgânico (não digerido) recuperado no extrato. As frações de P foram determinadas pela leitura em espectrofotômetro em um comprimento de onda de 660 nm (EMBRAPA, 1997).

O P orgânico total foi obtido pela soma das frações orgânicas de P. Já o P total foi obtido pela soma de todas as frações orgânicas e inorgânicas de P e a fração residual.

b) P remanescente

O fósforo remanescente (Prem) foi determinado utilizando-se um volume de 5 cm³ de terra fina seca ao ar (TFSA), que foi adicionado em erlenmeyers de 125 mL. As amostras foram colocadas em contato com uma solução de 0,01 mol L⁻¹ de CaCl_2 , com 60 mg L⁻¹ de P. Agitou-se por cinco minutos, deixando em repouso durante o período da noite (tempo de 16 horas). Após repouso, tomou-se uma alíquota de 1 mL do sobrenadante e adicionaram-se 9 mL de reagente de trabalho (solução 725 + ácido ascórbico). Após 30 minutos (tempo para a formação da cor), procedeu-se a leitura em espectrofotômetro em um comprimento de onda de 725 nm. Como método de referência, procedeu-se a leitura da curva padrão visando estimar o teor de P na solução de leitura.

c) Teores de carbono orgânico total

Haja vista sua importante relação com o fósforo no solo, foram determinados os teores de carbono orgânico total (COT) nas amostras de solo retiradas para avaliação da dinâmica das frações do P. A determinação do COT foi realizada por meio da oxidação da matéria orgânica pelo dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) a 0,2 mol L⁻¹ em meio sulfúrico, e pela titulação por sulfato ferroso amoniacal a 0,1 mol L⁻¹, segundo metodologia proposta pela EMBRAPA (CLAESSEN, 1997).

d) Características granulométricas

As características granulométricas do solo (argila, silte e areia) nos pontos de amostragem foram determinadas seguindo o método da pipeta, descrita pela EMBRAPA (CLAESSEN, 1997).

e) Características químicas do solo

A caracterização química do solo da área de estudo foi realizada utilizando os mesmos pontos amostrais e profundidades do fracionamento do P. As amostras foram encaminhadas para o laboratório de fertilidade do solo (UFRRJ) e a determinação das características químicas do solo seguiu a metodologia proposta pelo manual da EMBRAPA (CLAESSEN, 1997). Com base nos resultados das análises químicas, foram calculados os valores da

variável capacidade de troca cátions (CTC). Para a caracterização química, foram realizadas as análises: pH (em água), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al³⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺) e potássio (K⁺) trocáveis, fósforo disponível (P-Mehlich) e carbono orgânico (Corg). A partir desses resultados, foram calculados os valores de Soma de Bases (S), Capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por Alumínio (m) e Percentagem por saturação de Bases (V).

4.4.4 Análise dos dados

De posse do conjunto de dados, estes passaram por análise exploratória para obtenção dos valores máximo, mínimo e médio para cada variável. Posteriormente, foram calculadas as médias e medianas objetivando verificar se a distribuição dos dados apresentava normalidade. Além disso, foram calculados os coeficientes de assimetria e curtose, também para atestar a normalidade do conjunto de dados, de acordo com Montebeller et al. (2007).

As coordenadas geográficas dos pontos de amostragem do solo foram transformadas em unidades do sistema de projeção de Lambert, uma vez que o programa geoestatístico utilizado faz exigência de medidas lineares (MONTEBELLER et al., 2007). Foi utilizado o pacote computacional geoestatístico GEOSTAT (VIEIRA et al., 1983), que analisa a dependência espacial dos dados segundo a metodologia descrita por Vieira e Lombardi Neto (1995), que utiliza a semivariância ($\gamma(h)$). O parâmetro foi estimado pela equação 1, apresentada abaixo:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

Onde:

$\gamma(h)$ - semivariância estimada a uma distância h ;

$N(h)$ - número de pares de valores $[Z(x_i), Z(x_i + h)]$ separados por um vetor h ;

x_i - posição espacial da variável Z ;

Z - Valores dos dados para as variáveis.

De posse dos semivariogramas experimentais, foram ajustados os modelos teóricos que melhor os representam, tendo como variáveis o alcance (a), o efeito pepita (C_0), a semivariância estrutural (C) e o patamar ($C + C_0$) (MONTEBELLER et al., 2007; LIMA et al., 2016). Os modelos de semivariogramas considerados foram o esférico, o exponencial e o gaussiano (McBRATNEY; WEBSTER, 1986). Os modelos ajustados aos semivariogramas foram estimados pelas seguintes equações:

a) Modelo esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{A_0} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{A_0} \right)^3 \right], 0 < h < A_0$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1, h \leq A_0 \quad (2)$$

b) Modelo exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3 \frac{h}{A_0}\right) \right], 0 < h < d \quad (3)$$

Em que d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido.

c) Modelo gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3 \left(\frac{h}{A_0}\right)^2\right) \right], 0 < h < d \quad (4)$$

Para validação do modelo, foi utilizada a ferramenta “Jack Knifing” (VIEIRA et al., 1983). De acordo com Montebeller et al. (2007), esse procedimento compara os modelos ajustados e indica o número ideal de pontos vizinhos em torno daquele que está sendo estimado, permitindo verificar se as hipóteses de estacionaridade estão corretas e se o modelo ajustado é adequado, além de determinar qual a vizinhança ideal para se fazerem estimativas.

Sendo atestada a dependência espacial, foram estimados os valores para locais onde as variáveis não foram medidas, utilizando-se a krigagem, quantificada pelo semivariograma (alcance, efeito pepita e a semivariância estrutural), como método interpolador (LIMA et al., 2016). Para isto, foi utilizada a seguinte equação:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (5)$$

Onde:

$Z^*(x_0)$ - valor estimado para local x_0 não-amostrado;

$Z(x_i)$ - valor amostrado;

n - número de amostras vizinhas utilizadas nas estimativas;

λ_i - Pesos aplicados em cada valor $Z(x_i)$.

A classificação do grau de dependência espacial (GDE) foi realizada em função da razão entre o efeito pepita (C_0) e o patamar ($C_0 + C_1$), sendo considerada fraca para GDE superior a 75%, moderada entre 25 e 75% e forte para GDE inferior a 25% (CAMBARDELLA et al., 1994).

Para visualizar a distribuição espacial das variáveis analisadas, foram gerados mapas de isolinhas com auxílio do software SURFER 7.02 (GOLDEN SOFTWARE, 2000).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Análise descritiva dos dados

Nas Tabelas 8 e 9 estão sumarizados os dados da estatística descritiva de alguns atributos químicos e físicos determinados no módulo experimental de cultivo orgânico de hortaliças, nas profundidades de amostragem 0,0-0,05 m; 0,05-0,10, 0,10-0,20 m (Tabela 8) e 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m (Tabela 9). A análise descritiva tem a função de analisar o comportamento geral dos dados e identificar algum problema que possa exercer qualquer influência na análise geoestatística, apesar de considerar esses dados espacialmente independentes (ZANÃO JÚNIOR et al., 2010). Dados com distribuição normal possuem valores similares de média, mediana, moda e assimetria, variando em torno de $0 \pm 0,5$ e curtose menor que $\pm 0,5$ (VIEIRA et al., 2002). As variáveis indicadas por log, não obtiveram distribuição normal e os dados foram submetidos à transformação pela função logarítmica (PIAN, 2019).

A variabilidade de um atributo pode ser classificada segundo a magnitude de seu coeficiente de variação (CV) (DALCHIAVON, 2012). Segundo Carvalho et al. (2012) a variabilidade, medida pelo coeficiente de variação, é a primeira indicação da existência de heterogeneidade nos dados. Warrick e Nielsen (1980), propõem que os limites de coeficiente de variação, para a classificação da variabilidade dos atributos analisados, podem ser de $CV < 12 \%$, $12 \% < CV < 60 \%$ e $CV > 60 \%$, considerados de baixa, média e alta variabilidade, respectivamente. No presente estudo, a camada superficial de amostragem apresentou CV situando entre baixa e média variabilidade. Os atributos potencial hidrogeniônico (pH,) P remanescente (P rem), e areia apresentaram CV baixo, ou seja, a variação do desvio padrão em relação a média é menor que 12 %, com 7,45 %; 5,26 % e 5,58 %, respectivamente. Já acidez potencial (H+Al), capacidade de troca e cátions (CTC), carbono orgânico total (COT) fósforo disponível (P), argila e silte apresentaram CV médio, com 35,36 %; 24,03 %; 38,42 %; 37,71 %; 58,60 %; 40,91 %, respectivamente. Portanto, na camada mais superficial de amostragem a menor variabilidade dos dados foi observada para P rem, e a maior variabilidade ocorreu para argila (Tabela 8).

Na camada superficial de amostragem (0,0-0,05 m), os valores de assimetria e curtose demonstram distribuições assimétricas para os atributos estudados (Tabela 8). A simples observação dos valores da média e da mediana pode dar uma ideia da normalidade ou não da distribuição, no entanto, as medidas de assimetria e a curtose são mais apropriadas (JONES, 1969; CHICOTA; LIER, 2004). O coeficiente de assimetria é mais sensível a valores extremos do que a média e o desvio-padrão, uma vez que um único valor pode influenciar fortemente esse coeficiente, pois os desvios entre cada valor e a média são elevados à terceira potência (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Este coeficiente é utilizado para caracterizar como e quanto a distribuição de frequências se afasta da simetria. Se o valor encontrado for zero, a distribuição é simétrica; se positivo, a distribuição é assimétrica à direita; e se negativo, é assimétrica à esquerda (ZANÃO JÚNIOR et al., 2010).

Para os dados da camada superficial de amostragem, verificou-se sete atributos apresentando dados de assimetria à direita, ou seja, com valores positivos (H+Al, CTC, pH, COT, P, P rem e argila). Já os teores de areia e silte apresentaram distribuição assimétrica à esquerda, portanto, com valores negativos. Apesar de se ter verificado distribuições assimétricas, os coeficientes de assimetria e curtose próximos de zero, assim como valores médios e medianos próximos para a maioria dos atributos, permitem que lhes sejam aplicados tratamentos geoestatísticos (CHAVES; FARIAS, 2009), possibilitando avaliar a dependência espacial dos atributos, pois, na geoestatística, mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do efeito proporcional em que a média e a variância dos dados não sejam constantes na área de estudo (DALCHIAVON et al., 2012).

Na profundidade 0,05-0,10 m os coeficientes de variação (CV), assim como na profundidade 0,0-0,05 m, situaram entre baixo e médio (Tabela 3), de acordo com classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980). Os atributos pH e areia apresentaram CV baixo, alcançando coeficientes de 9,73 % e 6,27 %, respectivamente. Já os atributos H+Al, CTC, COT, P, P rem, argila e silte apresentaram CV médio, com 23,02 %; 22,66 %; 30,26 %; 58,36 %; 16,70 %; 45,36 % e 46,74 %, respectivamente. Nesta profundidade de amostragem, diferente da camada superficial, o menor coeficiente de variação foi verificado para areia (CV = 6,27 %), em contrapartida, o maior CV foi observado no P, que alcançou CV de 58,36 %. A variabilidade dos atributos químicos do solo é reflexo das interações dos processos de sua formação e de práticas de manejo, por exemplo, a aplicação de corretivos e de fertilizantes, além da necessidade da cultura, com impacto, principalmente, nas camadas superficiais do solo (SIQUEIRA et al., 2010).

Em relação aos coeficientes de assimetria e curtose, observa-se que todos os atributos estudados apresentaram valores situando próximos de zero, com exceção de H+Al, que atingiu coeficientes de assimetria e curtose de 1,26 e 2,00, respectivamente (tabela 3). Apesar de estarem próximos de zero, nenhum atributo apresentou simetria, já que situaram abaixo ou acima de zero. Verificou-se sete atributos apresentando dados de assimetria à direita, ou seja, com valores positivos (H+Al, CTC, COT, P, P rem, argila e silte). Já os atributos pH e areia apresentaram dados de assimetria à esquerda (valores negativos), sendo -0,23 e -0,70, respectivamente. Em relação a curtose, somente três atributos atingiram coeficiente positivos, que foram H+Al, COT e P rem, com 2,00; 0,91 e 0,41, respectivamente. Os demais atributos apresentaram dados de assimetria com valores negativos, situando entre -0,03 (CTC) e -0,21 (areia). Assim como observado na camada superficial do solo, os coeficientes de assimetria e curtose próximos de zero para a maioria dos atributos, permitem que lhes sejam aplicados tratamentos geoestatísticos (CHAVES; FARIAS, 2009). Como já discutido, o mais importante é a ocorrência ou não do efeito proporcional, em que a média e a variabilidade dos dados são constantes na área de estudo, o que não ocorreu no presente estudo, já que os semivariogramas apresentam patamares bem definidos e a distribuição não apresentou caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as estimativas da krigagem ordinária, as quais são baseadas nos valores médios (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Já para profundidade seguinte (0,10-0,20 m), verificou-se que os CVs (%) foram classificados em baixo, médio e alto (WARRICK; NIELSEN 1980). Os atributos pH, COT e areia apresentaram coeficientes de variação baixo (tabela 3). Os atributos H+Al, CTC, P rem, argila e silte apresentaram CVs (%) classificados como médio. Já o P apresentou CV (%) alto. Assim como na camada de 0,05-0,10 m, o menor CV foi verificado na areia, e o mais alto coeficiente foi observado no P disponível (Tabela 3).

Em relação aos coeficientes de assimetria e curtose para esta profundidade, nota-se que os atributos mantiveram os coeficientes próximos de zero, com alguns atributos apresentando valores um pouco mais distantes, porém não alcançando coeficientes acima de 3 (três). Nenhum atributo apresentou simetria, uma vez que se situaram acima ou abaixo de zero. Seis atributos apresentaram dados de assimetria à direita, com valores positivos, sendo estes H+Al, CTC, COT, P, argila e silte, com coeficientes de 0,73; 0,33; 1,29; 0,88; 0,39 e 1,03, respectivamente. Já pH, P rem e areia apresentaram dados de assimetria à esquerda, com -0,37; -0,16 e -1,04, respectivamente. Já para curtose, o CTC, o pH e a argila tiveram valores negativos (à esquerda) e os demais atributos apresentaram valores positivos, ou seja, à direita. A normalidade dos dados e, quando necessária, sua transformação por função log pode ser verificada nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8. Estatística descritiva de atributos químicos e físicos do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Seropédica, RJ, 2019.

Variável	Unidade	Média	Variância	D.P.	C.V.	Min.	Max.	Assimetria	Curtose	N.D.
Profundidade 0,0 – 0,05 m										
H+Al	Cmol _c dm ³	2,33	0,68	0,83	35,36	1,00	6,56	2,37	0,51	Log
CTC	Cmol _c dm ³	7,06	2,88	1,70	24,03	4,21	11,61	0,59	-0,29	N
pH	---	6,39	0,23	0,48	7,45	5,20	7,90	0,29	1,75	N
COT	g kg ⁻¹	15,66	36,21	6,02	38,42	6,90	39,10	1,46	2,54	N
P	mg dm ⁻³	509	36830	191,90	37,71	240,30	963,0	0,89	0,09	N
P rem	mg kg ⁻¹	32,49	2,92	1,71	5,26	29,26	38,85	1,22	2,87	N
Argila	%	5,29	9,62	3,10	58,60	1,60	20,26	0,15	-0,10	Log
Areia	%	86,66	23,37	4,83	5,58	72,95	93,41	-0,60	-0,44	N
Silte	%	8,05	10,84	3,29	40,91	2,88	14,27	-0,10	-1,47	N
Profundidade 0,05 – 0,10										
H+Al	Cmol _c dm ³	4,23	0,95	0,97	23,02	2,62	7,60	1,26	2,00	N
CTC	Cmol _c dm ³	8,59	3,79	1,95	22,66	5,49	14,15	0,63	-0,03	N
pH	---	5,75	0,31	0,56	9,73	4,60	7,10	-0,23	-0,20	N
COT	g kg ⁻¹	19,59	35,13	5,93	30,26	8,50	40,00	0,58	0,91	N
P	mg dm ⁻³	139,20	6597	81,22	58,36	26,78	351,70	0,59	-0,18	N
P rem	mg kg ⁻¹	29,76	24,70	4,97	16,70	20,67	44,24	0,99	0,41	N
Argila	%	8,11	13,54	3,68	45,36	3,00	18,00	0,81	-0,07	N
Areia	%	86,22	29,19	5,40	6,27	72,00	94,00	-0,70	-0,21	N
Silte	%	5,63	6,91	2,63	46,74	1,00	13,00	0,35	-0,08	N
Profundidade 0,10 – 0,20										
H+Al	Cmol _c dm ³	3,04	1,43	1,20	39,32	0,83	6,20	0,73	0,26	N
CTC	Cmol _c dm ³	5,21	3,03	1,74	33,43	2,01	8,67	0,33	-0,91	N
pH	---	5,79	0,46	0,68	11,69	4,50	6,70	-0,37	-1,36	N
COT	g kg ⁻¹	17,88	3,32	1,82	10,18	15,30	24,85	1,29	2,36	N

Continua...

Continuação da **Tabela 8.**

Variável	Unidade	Média	Variância	D.P.	C.V.	Min.	Max.	Assimetria	Curtose	N.D.
Profundidade 0,10 – 0,20										
P	mg dm ⁻³	144,00	11800	108,60	75,44	24,00	433,20	0,88	0,10	N
P rem	mg kg ⁻¹	33,51	18,51	4,30	12,84	19,88	43,38	-0,16	0,60	N
Argila	%	9,25	12,39	3,52	38,05	5,00	24,00	0,39	-0,45	Log
Areia	%	84,97	30,70	5,54	6,52	61,00	92,00	-1,04	2,67	Log
Silte	%	5,76	9,73	3,12	54,12	0,01	24,00	1,03	2,54	Log

Na Tabela 9 estão sumarizados os dados da estatística descritiva de alguns atributos químicos e físicos determinados no módulo experimental de cultivo orgânico de hortaliças, nas profundidades de 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. Na camada 0,20-0,40 m, o coeficiente de variação dos atributos do solo foram classificados como médio ou alto, segundo classificação de Warrick e Nielsen (1980). Os atributos H+Al, CTC, pH, P, P rem e areia apresentaram CV (%) médio, ou seja, a variação do desvio padrão em relação a média é maior que 12 % e menor que 60 %, com os valores atingindo 45,76 %; 32,52 %, 13,86 %, 51,65 %, 26,46 % e 14,35 %, respectivamente. Já o COT, argila e silte apresentaram CV (%) alto, ou seja, a variação do desvio padrão em relação à média foi maior que 60 %, com 80,06; 78,69 % e 61,62 %, respectivamente. Dessa forma, nesta profundidade de amostragem, a menor variabilidade dos dados foi observada para pH, e a maior variabilidade ocorreu no COT (Tabela 9). Nota-se que houve um aumento dos CVs (%) para todos os atributos do solo na camada 0,20-0,40 m (Tabela 9) em relação às camadas mais superficiais de amostragem (Tabela 8).

No que diz respeito aos coeficientes de assimetria e curtose para esta profundidade, observa-se que, assim como na camada anterior (0,10-0,20 m) os atributos estudados mantiveram os coeficientes próximos de zero, com alguns atributos apresentando valores um pouco mais distantes, porém não alcançando coeficientes acima de 3 (três). Os atributos não apresentaram distribuição simétrica, pois situaram acima ou abaixo de zero, repetindo o verificado nas profundidades anteriores. Cinco atributos apresentaram dados de assimetria à direita, ou seja, com valores positivos, sendo estes H+Al, CTC, COT, P disponível e argila, com coeficientes de 1,82; 0,30; 0,79; 0,51 e 0,93, respectivamente. Já os atributos do solo pH, P rem, areia e silte apresentaram dados de assimetria à esquerda, ou seja, com valores negativos, alcançando -0,64; -0,40; -0,81 e -0,94, respectivamente. Para curtose, a maioria dos atributos atingiram valores negativos, que foram CTC, pH, COT, P, P rem, argila e areia, sendo estes -0,99; -0,97; -0,47; -0,44; -0,106; -0,50 e -0,85. Já atributos H+Al e silte apresentaram valores positivos, ou seja, à direita, alcançando 0,52 e 2,26.

Na camada mais profunda de amostragem do solo (0,40-0,60 m), assim como na camada anterior (0,20-0,40 m), o coeficiente de variação dos atributos do solo foram classificados como médio ou alto, segundo classificação de Warrick e Nielsen (1980). Os atributos H+Al, CTC, pH, P, P rem, areia e silte apresentaram CV (%) médio, ou seja, a variação do desvio padrão em relação a média é maior que 12 % e menor que 60 %, com os valores alcançando 55,27 %; 48,79 %, 12,15 %, 48,86 %, 36,53 %, 21,59 % e 59,21 %, respectivamente. Enquanto que o COT e argila apresentaram CV (%) alto, ou seja, a variação do desvio padrão em relação a média foi maior que 60 %, com 162,90 e 70,88 %, respectivamente. Nesta profundidade os atributos H+Al, CTC, COT, P rem areia e argila seguiram o padrão observado na profundidade anterior, onde os valores de CV (%) aumentaram em função do aumento da profundidade de amostragem do solo. No entanto, o pH, P e argila apresentaram CVs maiores na profundidade de 0,20-0,40 m.

Para os coeficientes de assimetria e curtose na camada mais profunda do solo, os atributos também apresentaram coeficientes próximos de zero, principalmente em relação a assimetria. Na última profundidade estudada, os coeficientes de assimetria e curtose situaram abaixo ou acima de zero, ou seja, não apresentaram distribuição simétrica (valor de assimetria = 0,0). Cinco atributos do solo apresentaram dados de assimetria à direita, sendo estes H+Al, COT, P, argila e silte, com coeficientes de 1,11; 0,73; 0,53; 0,30 e 1,07, respectivamente. Por outro lado, os atributos CTC, pH, P rem e areia apresentaram dados assimétricos à esquerda, com -0,08; -0,16, -0,11 e -0,24, respectivamente.

Tabela 9. Estatística descritiva de atributos químicos e físicos do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. Seropédica, RJ, 2019.

Variável	Unidade	Média	Variância	D.P.	C.V.	Min.	Max.	Assimetria	Curtose	N.D.*
Profundidade 0,20 – 0,40 m										
H+Al	Cmol _c dm ³	2,55	1,36	1,17	45,76	1,10	6,75	1,82	0,52	Log
CTC	Cmol _c dm ³	5,05	2,70	1,64	32,52	2,41	8,69	0,30	-0,99	N
pH	---	5,66	0,61	0,78	13,86	4,00	6,80	-0,64	-0,97	N
COT	g kg ⁻¹	3,81	9,30	3,05	80,06	0,30	11,28	0,79	-0,47	N
P	mg dm ⁻³	68,39	1247	35,32	51,65	19,10	153,70	0,51	-0,44	N
P rem	mg kg ⁻¹	24,18	40,94	6,40	26,46	11,30	34,08	-0,40	-1,06	N
Argila	%	13,21	108,00	10,39	78,69	3,00	37,00	0,93	-0,50	N
Areia	%	79,03	128,60	11,34	14,35	55,00	92,00	-0,81	-0,85	N
Silte	%	7,76	22,89	4,78	61,62	1,00	38,00	-0,94	2,26	Log
Profundidade 0,40 – 0,60 m										
H+Al	Cmol _c dm ³	2,39	1,74	1,32	55,27	0,19	7,69	1,11	2,55	N
CTC	Cmol _c dm ³	4,96	5,85	2,42	48,79	0,93	10,11	-0,08	-1,32	N
pH	---	5,56	0,46	0,68	12,15	4,10	6,90	-0,16	-0,97	N
COT	g kg ⁻¹	0,86	1,96	1,40	162,90	0,12	10,90	0,73	0,54	Log
P	mg dm ⁻³	45,64	497,20	22,30	48,86	20,02	137,20	0,53	-0,38	Log
P rem	mg kg ⁻¹	16,84	37,85	6,15	36,53	6,35	24,84	-0,11	-1,54	N
Argila	%	20,50	211,20	14,53	70,88	3,00	47,00	0,30	-1,52	N
Areia	%	72,92	247,90	15,75	21,59	44,00	92,00	-0,24	-1,56	N
Silte	%	6,60	15,26	3,91	59,21	3,00	30,00	1,07	2,82	Log

H+Al = Acidez potencial; CTC = Capacidade de troca de cátions; pH = Potencial hidrogeniônico; P = Fósforo disponível e P rem = Fósforo remanescente. D.P. = Desvio padrão; C.V. (%) = Coeficiente de variação; Min. = Valor mínimo; Max. = valor máximo; N.D. = Normalidade dos dados. *N dados normais; Log = transformação dos dados por função log.

Na Tabela 10 estão sumarizados os resultados da estatística descritiva das formas inorgânicas e orgânicas de P, fração residual, P orgânico total e P total do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Verificou-se que, de acordo com classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), os coeficientes de variação foram altos nas duas profundidades superficiais de amostragem do solo (0,0-0,05 m e 0,05-0,10 m), com exceção do teor de Pi moderadamente resistente (Pi OH), que apresentou CV (%) médio, tendo nas duas profundidades atingido 50 %. Na camada superficial, os valores de CV (%) variaram entre 50,14 (Pi OH) e 105,80, observado para Po moderadamente lábil (Po H). Na camada inferior (0,05-0,10 m), os valores de coeficiente de variação situaram entre 50,41 %, verificado no Pi OH e 98,64, observado na fração residual de P. Apesar de ter ocorrido altos valores de CV (%), para os teores de P em todas as frações na área de estudo, identificou-se que a maior porção do grid amostral apresentou valores próximos entre si, tendo poucos pontos amostrais com teores de P discrepantes. Os teores mais altos foram observados todos próximos entre si, ou seja, em uma mesma porção do grid (subsistema tomate/telado). Portanto, não foram considerados *outliers* na ocasião da análise exploratória.

Na camada superficial de amostragem (0,0-0,05 m), o menor teor de P foi verificada na fração orgânica moderadamente recalcitrante (Po OH) (0,91 mg kg⁻¹). Por outro lado, o maior teor (920,70 mg kg⁻¹) foi observado na fração moderadamente lábil, também na forma orgânica de P (Po H). Na profundidade inferior de amostragem (0,05-0,10 m), o menor valor foi observado no P residual, alcançando 1,34 mg kg⁻¹, e o maior valor foi verificado no Po moderadamente lábil (Po H), assim como ocorrido na profundidade 0,0-0,05 m. (Tabela 10).

Para os coeficientes de assimetria e curtose, tanto na camada de 0,0-0,05 m quanto na camada 0,05-0,10 os valores de assimetria ficaram próximos de zero, variando entre 0,26 (P residual) e 1,36 (Pi H) na camada superficial do solo. Já na camada inferior (0,05-0,10 m), o menor coeficiente de assimetria foi de 0,58 (Pi lábil), e o maior foi de 1,25 (P residual). Nas duas profundidades analisadas, os coeficientes de assimetria demonstram distribuições assimétricas para todas as frações de P inorgânico e orgânico, a fração residual, Po total e P total do solo, uma vez que foram diferentes de zero, mantendo-se a direita, ou seja, com valores positivos. Apesar de não apresentarem distribuições simétricas, todas as frações atingiram coeficientes próximos de zero, permitindo assim que lhes sejam aplicados tratamentos geoestatísticos (CHAVES; FARIAS, 2009).

Para coeficiente de curtose, na camada 0,0-0,05 m, os valores apresentaram-se próximos de zero, com seis variáveis com valores negativos, sendo Pi lábil (P bic), Po H, Po OH, P residual, Po total e P total, com -0,23; -0,78; -0,94; -0,78; -0,66 e -0,56, respectivamente. Por outro lado, o Pi H, Pi OH e Po bic apresentaram valores positivos, com 0,92; 0,07 e 1,83, respectivamente. Para a camada de 0,05-0,10 m, o coeficiente de curtose atingiu valores negativos em sete variáveis, sendo estas todas as frações de Pi, as frações lábil e moderadamente lábil de Po, o Po total e P total. Já a fração moderadamente resistente de Po e o P residual, apresentaram coeficiente de curtose à direita.

Em relação à camada 0,10-20 m (tabela 5), os coeficientes de variação foram classificados como alto para todas as variáveis. Os CVs (%) para esta profundidade do solo variaram entre 67,34 (Po moderadamente lábil) e 114,80 (Po total). Assim como ocorreu nas profundidades mais superficiais, apesar da alta variabilidade dos dados poucos valores foram discrepantes, tendo poucos pontos amostrais com teores altos, o que pode ser confirmado pelas médias, que foram baixas quando comparada aos teores mais altos de P na área estudada, principalmente para a fração moderadamente lábil de P inorgânico (Pi H) e orgânico (Po H) (Tabela 10).

Tabela 10. Estatística descritiva das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Seropédica, RJ, 2019.

Variável	Unidade	Média	Variância	D.P.	C.V.	Min.	Max.	Assimetria	Curtose	N.D.
Profundidade 0,0 – 0,05										
Pibic	mg kg ⁻¹	38,73	840,70	29,00	74,86	3,60	108,20	0,84	-0,23	Log
Pi H	mg kg ⁻¹	181,20	28650	169,30	93,43	9,74	686,00	1,36	0,92	N
Pi OH	mg kg ⁻¹	24,96	156,60	12,51	50,14	8,60	57,76	0,91	0,07	Log
Pobic	mg kg ⁻¹	9,84	40,05	6,33	64,32	2,38	33,62	1,26	1,83	N
Po H	mg kg ⁻¹	177,80	35380	188,10	105,80	28,81	920,70	0,48	-0,78	Log
Po OH	mg kg ⁻¹	5,79	12,30	3,51	60,55	0,91	12,88	0,36	-0,94	N
P residual	mg kg ⁻¹	8,28	75,10	8,67	104,70	1,16	38,96	0,26	-0,78	Log
Po total	mg kg ⁻¹	193,50	37160	192,80	99,63	38,68	955,10	0,56	-0,66	Log
P total	mg kg ⁻¹	446,60	102900	320,70	71,81	65,61	1282,00	0,73	-0,56	N
Profundidade 0,05 – 0,10										
Pibic	mg kg ⁻¹	67,87	2517	50,17	73,91	6,81	181,8	0,58	-0,78	N
Pi H	mg kg ⁻¹	206	28280	168,2	81,65	22,95	593,5	0,81	-0,6	N
Pi OH	mg kg ⁻¹	18,7	88,88	9,43	50,41	5,33	42,17	0,71	-0,51	N
Pobic	mg kg ⁻¹	78,06	3822	61,82	79,2	8,6	216,4	0,74	-0,63	N
Po H	mg kg ⁻¹	112,8	12110	110	97,51	17,96	408,3	0,95	-0,43	N
Po OH	mg kg ⁻¹	8,9	32,13	5,67	63,66	1,44	27,48	0,91	0,52	N
P residual	mg kg ⁻¹	14,75	211,6	14,55	98,64	1,34	59,66	1,25	0,62	N
Po total	mg kg ⁻¹	199,8	21830	147,8	73,95	41,11	530	0,83	-0,62	N
P total	mg kg ⁻¹	507,1	130600	361,4	71,28	100,9	1256	0,65	-0,85	N
Profundidade 0,10 – 0,20										
Pibic	mg kg ⁻¹	59,33	2656	51,54	86,87	3,10	179,40	0,72	-0,54	N
Pi H	mg kg ⁻¹	173,50	28840	169,80	97,90	32,26	611,90	1,55	1,03	N
Pi OH	mg kg ⁻¹	9,46	59,75	7,73	81,71	0,95	41,47	-0,51	0,00	Log
Pobic	mg kg ⁻¹	20,64	297,80	17,26	83,61	4,11	58,38	1,13	-0,38	N
Po H	mg kg ⁻¹	81,01	11900	109,10	134,60	6,95	424,10	1,88	2,32	N
Po OH	mg kg ⁻¹	10,08	46,06	6,79	67,34	2,44	31,86	1,42	1,40	N
P residual	mg kg ⁻¹	10,39	69,15	8,32	80,07	1,29	33,73	1,02	0,36	N
Po total	mg kg ⁻¹	111,70	16460	128,30	114,80	23,55	476,50	1,72	1,60	N
P total	mg kg ⁻¹	364,40	119800	346,10	94,99	66,50	1314,00	1,49	1,02	N

Na profundidade de amostragem 0,10-0,20 m, o menor teor de P foi verificado na fração Pi OH (0,95 mg kg⁻¹). Por outro lado, o maior teor (611,90 mg kg⁻¹) foi observado na fração lábil, também na forma inorgânica de P (Pi H) (Tabela 10).

Para os coeficientes de assimetria e curtose, assim como nas camadas de 0,0-0,05 m e 0,05-0,10 m os valores de assimetria ficaram próximos de zero, contudo, com mais variáveis apresentando coeficientes um pouco mais distantes de zero. Os valores variaram entre -0,51 (Pi OH) e 1,88 (Pi H). Os coeficientes de assimetria demonstram distribuições assimétricas para todas as frações de P inorgânico e orgânico, a fração residual, P orgânico total e P total do solo, uma vez que foram diferentes de zero, com oito variáveis mantendo-se à direita e Pi OH mantendo-se à esquerda, com valor negativo (Tabela 10). Apesar de não apresentarem distribuições simétricas, todas as frações apresentaram dados de coeficiente próximos de zero, permitindo que lhes sejam aplicados tratamentos geoestatísticos (CHAVES; FARIAS, 2009), assim como ocorrido nas camadas mais superficiais de amostragem do solo.

Para coeficiente de curtose os valores de oito variáveis apresentaram-se próximos de zero, e a fração de Pi moderadamente recalcitrante apresentou coeficiente de 0,0 (zero), após transformação dos dados por função log. Duas variáveis atingiram valores negativos, sendo estas Pi lábil e Po moderadamente lábil, com -0,54 e -0,38, respectivamente. Já as demais apresentaram valores positivos, variando entre 0,36 (P residual) e 2,32 (Po H) (Tabela 10).

Os resultados da estatística descritiva das formas inorgânicas e orgânicas de P, fração residual, P orgânico total e P total do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m são apresentados na Tabela 11. Observa-se que na profundidade 0,20-0,40 m, todas as variáveis apresentaram CV (%) alto. Os CVs (%) variaram entre 70,90 (P residual) e 170,90 (Po H). O menor teor de P foi verificado na fração Pi OH (0,24 mg kg⁻¹). Já o maior teor (518,80 mg kg⁻¹) foi observado na fração Po H (Tabela 11).

No que diz respeito aos coeficientes de assimetria e curtose, os valores para assimetria ficaram próximos de zero, indicando a normalidade dos dados. Algumas variáveis atingiram valores de coeficientes mais distantes, porém, próximos o suficiente para serem considerados como distribuições normais (CARVALHO et al., 2002). Todos os coeficientes situaram à direita do zero, ou seja, com valores positivos, variando entre 0,51 (P residual) e 2,11 (Po H). Nota-se que nenhuma variável apresentou distribuição simétrica, ou seja, assimetria = 0,0. Contudo, como citado anteriormente, flutuaram muito próximos de zero, permitindo que seja utilizada análise geoestatística.

Para coeficiente de curtose, os valores de oito variáveis apresentaram-se próximos de zero. Já Po H, mesmo após transformação dos dados por função log, apresentou curtose de 4,69, mais distante do valor ideal, ultrapassando o limite de 3, que de acordo com Carvalho et al. (2002), indica a normalidade dos dados. Quatro variáveis atingiram valores negativos (Po OH, P residual, Po total e P total). Já as demais variáveis apresentaram valores positivos, variando entre 0,39 (Pi bic) e 4,69 (Po H) (Tabela 10).

Na camada mais profunda de amostragem (0,40-0,60), de maneira geral, foram encontrados os CVs (%) mais baixos em comparação às profundidades anteriores. Sete variáveis apresentaram CVs médio, enquanto que duas apresentaram CVs classificados como alto. Os valores variaram entre 32,39 (Po total) e 64,66 (Pi H). O teor mínimo foi verificado no Pi OH (0,46 mg kg⁻¹) e o maior teor foi observado no Pi H, com 167,50 mg kg⁻¹.

Os coeficientes de assimetria e curtose se mantiveram entre 0 (zero) e 3 (três) (sem a necessidade de transformação dos dados por função log), o que indica que os dados para a camada mais profunda do solo apresentaram distribuições normais, segundo Carvalho et al. (2002).

Tabela 11. Estatística descritiva das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. Seropédica, RJ, 2019.

Variável	Unidade	Média	Variância	D.P.	C.V.	Min.	Max.	Assimetria	Curtose	N.D.
Profundidade 0,20 – 0,40 m										
Pi bic	mg kg ⁻¹	33,45	565,90	23,79	71,12	5,10	97,49	0,91	0,39	N
Pi H	mg kg ⁻¹	81,75	3749	61,23	74,90	14,04	272,00	1,14	1,24	N
Pi OH	mg kg ⁻¹	6,63	60,62	7,79	117,40	0,24	34,10	1,53	1,92	N
Po bic	mg kg ⁻¹	117,60	16500	128,40	109,20	27,07	488,80	1,54	1,05	N
Po H	mg kg ⁻¹	63,69	11850	108,90	170,90	16,41	518,80	2,11	4,69	Log
Po OH	mg kg ⁻¹	12,45	87,75	9,37	75,25	1,68	33,86	0,59	-1,25	N
P residual	mg kg ⁻¹	24,97	308,10	17,55	70,29	4,95	70,79	0,77	-0,45	N
Po total	mg kg ⁻¹	193,70	40930	202,30	104,40	56,97	941,50	0,93	-0,51	Log
P total	mg kg ⁻¹	340,60	85300	292,10	85,76	87,38	1402,00	0,51	-0,80	Log
Profundidade 0,40 – 0,60 m										
Pi bic	mg kg ⁻¹	16,90	56,12	7,49	44,33	6,03	41,53	1,18	1,71	N
Pi H	mg kg ⁻¹	61,20	1566,00	39,57	64,66	5,24	167,50	0,54	-0,46	N
Pi OH	mg kg ⁻¹	6,34	12,31	3,51	55,31	0,46	15,00	0,47	-0,62	N
Po bic	mg kg ⁻¹	12,31	49,37	7,03	57,06	3,04	35,97	1,35	1,99	N
Po H	mg kg ⁻¹	38,22	176,70	13,29	34,78	13,63	88,79	0,94	1,99	N
Po OH	mg kg ⁻¹	16,48	101,90	10,09	61,24	2,63	49,58	1,49	2,03	N
P residual	mg kg ⁻¹	36,45	370,20	19,24	52,80	10,48	86,79	0,78	-0,31	N
Po total	mg kg ⁻¹	67,01	471,20	21,71	32,39	23,19	141,80	0,74	0,76	N
P total	mg kg ⁻¹	187,90	5501,00	74,17	39,47	54,12	384,50	0,46	-0,67	N

Pi bic = P inorgânico lábil; Pi H = P inorgânico moderadamente lábil; P OH = Pi moderadamente resistente; Po bic = P orgânico lábil; Po H = P orgânico moderadamente lábil; P OH = P orgânico moderadamente resistente. D.P. = Desvio padrão; C.V. (%) = Coeficiente de variação; Min. = Valor mínimo; Max. = valor máximo; N.D. = Normalidade dos dados. *N dados normais; Log = transformações dos dados por função log.

4.5.2 Análise dos parâmetros dos semivariogramas dos atributos avaliados

Os dados dos parâmetros dos semivariogramas dos atributos químicos e físicos do solo do Módulo de Cultivo Orgânico de Hortaliças, nas profundidades 0,0-0,05 m, 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m, estão apresentados na Tabela 12. Já os semivariogramas experimentais para os atributos nas três profundidades podem ser visualizados nas Figuras 7 (partes A-I), 8 (partes A-I) e 9 (partes A-I). Para todas as variáveis analisadas na profundidade 0,0-0,05 m, houve ajuste a algum modelo de semivariograma, indicando dependência espacial na área estudada (CRUZ et al., 2010).

Tabela 12. Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados dos atributos químicos e físicos do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Seropédica, RJ, 2019.

Variável	Modelo	C0	C1	Patamar	Alcance	R ²	GDE
Profundidade 0,0 – 0,05 m							
H+Al	Esférico	0,0	0,67	0,67	16,26	0,90	0,0%
CTC	Gaussiano	0,00	0,51	0,51	17,61	0,90	0,0%
pH	Esférico	0,29	0,66	0,95	19,00	0,54	30,5%
COT	Esférico	0,26	0,50	0,76	16,00	0,48	34,2%
P	Esférico	0,10	0,94	1,04	16,72	0,92	9,6%
P rem	Esférico	0,00	0,75	0,75	17,99	0,93	0,0%
Argila	Gaussiano	0,11	0,56	0,67	27,05	0,90	16,4%
Areia	Gaussiano	0,14	0,35	0,49	41,00	0,76	28,6%
Silte	Gaussiano	0,15	0,39	0,54	41,00	0,89	27,8%
Profundidade 0,05 – 0,10 m							
H+Al	Gaussiano	0,0	0,79	0,79	14,50	0,92	0,0%
CTC	Esférico	0,22	0,41	0,63	31,25	0,93	34,9%
pH	Esférico	0,08	0,83	0,91	27,35	0,88	8,8%
COT	Esférico	0,01	0,65	0,66	19,41	0,93	1,5%
P	Esférico	0,04	0,38	0,42	35,00	0,85	9,5%
P rem	Esférico	0,00	0,77	0,77	20,96	0,96	0,0%
Argila	Esférico	0,07	0,47	0,54	34,00	0,85	13,0%
Areia	Gaussiano	0,21	0,31	0,52	41,00	0,87	40,4%
Silte	EPP	EPP	---	---	---	---	---
Profundidade 0,10 – 0,20 m							
H+Al	Esférico	0,00	0,85	0,85	35,00	0,94	0,0%
CTC	Esférico	0,00	0,73	0,73	33,80	0,93	0,0%
pH	Esférico	0,00	0,51	0,51	33,80	0,92	0,0%
COT	Esférico	0,00	0,84	0,84	23,08	0,93	0,0%
P	Gaussiano	0,20	0,37	0,57	35,00	0,76	35,1%
P rem	Esférico	0,45	0,50	0,95	35,00	0,83	47,4%
Argila	Esférico	0,06	0,64	0,70	33,83	0,93	8,6%
Areia	Esférico	0,07	0,43	0,50	34,71	0,89	14,0%
Silte	Esférico	0,07	0,49	0,56	28,19	0,88	12,5%

H+Al = Acidez potencial; CTC = Capacidade de troca de cátions; pH = Potencial hidrogeniônico; P = Fósforo disponível e P rem = Fósforo remanescente. C0 = Efeito pepita; C1 = Variância estrutural; R² = Coeficiente de determinação; GDE = Grau de dependência espacial(C0/(C0+C1)*100).

O comportamento das variáveis regionalizadas não foi aleatório e as distâncias entre pontos utilizadas na malha geoestatística foram suficientes para o estudo da variabilidade espacial (DALCHIAVON et al., 2012).

Ao analisar os modelos ajustados para profundidade superficial, nota-se que cinco atributos se ajustaram ao modelo esférico, sendo estes: H+Al - Figura 7 (A); pH - Figura 7 (C); COT - Figura 7 (D); P - Figura 7 (E) e P rem - Figura 7 (F). Já os atributos: CTC - Figura 7 (B); argila - Figura 7 (G); areia - Figura 7 (H) e silte - Figura 7 (I) se ajustaram ao modelo gaussiano.

Verificou-se que alguns atributos não apresentaram efeito pepita (H+Al, CTC e P rem), e os demais apresentaram valores baixos, variando entre 0,10 (P) e 0,26 (COT). O efeito pepita é um parâmetro que indica a variabilidade não explicada, devido aos erros de medição ou a uma variação não detectada pela grade de amostragem (CAMPARDELLA et al., 1994). Portanto, este resultado reflete menor descontinuidade entre os pontos amostrais, pois, segundo Vieira (2000), quanto menor a proporção do efeito pepita em relação ao patamar do semivariograma, maior será a dependência espacial apresentada pelo atributo que reflete em maior continuidade do fenômeno, menor a variância da estimativa e maior confiança no valor estimado.

Em relação ao alcance, observa-se que este variou entre 16,0 m (COT - Figura 7 (D) e Tabela 13) e 41,0 m (areia e silte - Figura 7 (H e I) e Tabela 13). Porém, vale destacar que, para a maioria dos atributos, o alcance situou entre 16 e 19 m. O alcance é o principal parâmetro fornecido pela geoestatística (DALCHIAVON et al., 2012). É uma medida importante no estudo dos semivariogramas para planejamento e avaliação experimental, podendo auxiliar na definição de procedimentos amostrais (WEBSTER, 1985), uma vez que significa a distância máxima que uma variável se correlaciona espacialmente (DAVIS, 1986), o que quer dizer que determinações realizadas a distâncias maiores que o alcance, apresentam distribuição aleatória e, por isso, são independentes entre si (ZANÃO JÚNIOR et al., 2010). Estimativas feitas com interpolação por krigagem utilizando valores de alcances maiores tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representam melhor a realidade (CORÁ et al., 2004).

Para os coeficientes de determinação (R^2) (Tabela 13), os dados apresentaram ótimos ajustes para a maioria dos atributos avaliados. Nota-se que este variou entre 0,48 (COT) e 0,93 (P rem), com a maioria dos atributos atingindo R^2 acima de 0,80 (0,90; 0,90; 0,92; 0,93; 0,90 e 0,89 para H+Al, CTC, P, P rem, argila e silte, respectivamente). Já a areia apresentou R^2 de 0,76, e os menores coeficientes de determinação foram observados para pH e COT, com 0,54 e 0,48, respectivamente (Tabela 13).

A variação do grau de dependência espacial (GDE) foi de 0 a 34%, o que indica que os atributos apresentam um máximo de 34% de aleatoriedade nos dados amostrais (Tabela 13). Seguindo a classificação de dependência espacial proposta por Cambardella et al. (1994), realizada em função da razão entre o efeito pepita (C_0) e o patamar ($C_0 + C_1$), verifica-se que o GDE variou entre forte e moderado. Nesta classificação, valores de $[(C_0/(C_0+C_1)) \times 100]$ menores que 25% são considerados com dependência espacial forte, valores entre 25 e 75 % indicam dependência espacial moderada e valores maiores que 75%, dependência espacial fraca. Assim, cinco atributos apresentaram GDE forte, com 0,0 (zero) para H+Al, CTC e P rem, e, 9,6% e 16,4% para P e argila, respectivamente. Por outro lado, os atributos pH, COT, areia e silte atingiram GDE de 30,5%; 34,2%; 28,6% e 27,8%, respectivamente (tabela 7). Dessa forma, pode-se observar que a distribuição dos atributos no espaço não é aleatória, uma vez que todos apresentaram valores moderados ou fortes para o grau de dependência espacial (MATIAS et al., 2015). Lima et al. (2010) afirmam que quanto maior a dependência espacial da variável, melhor estrutura espacial e maior precisão podem ser obtidas na estimativa em locais não amostrados.

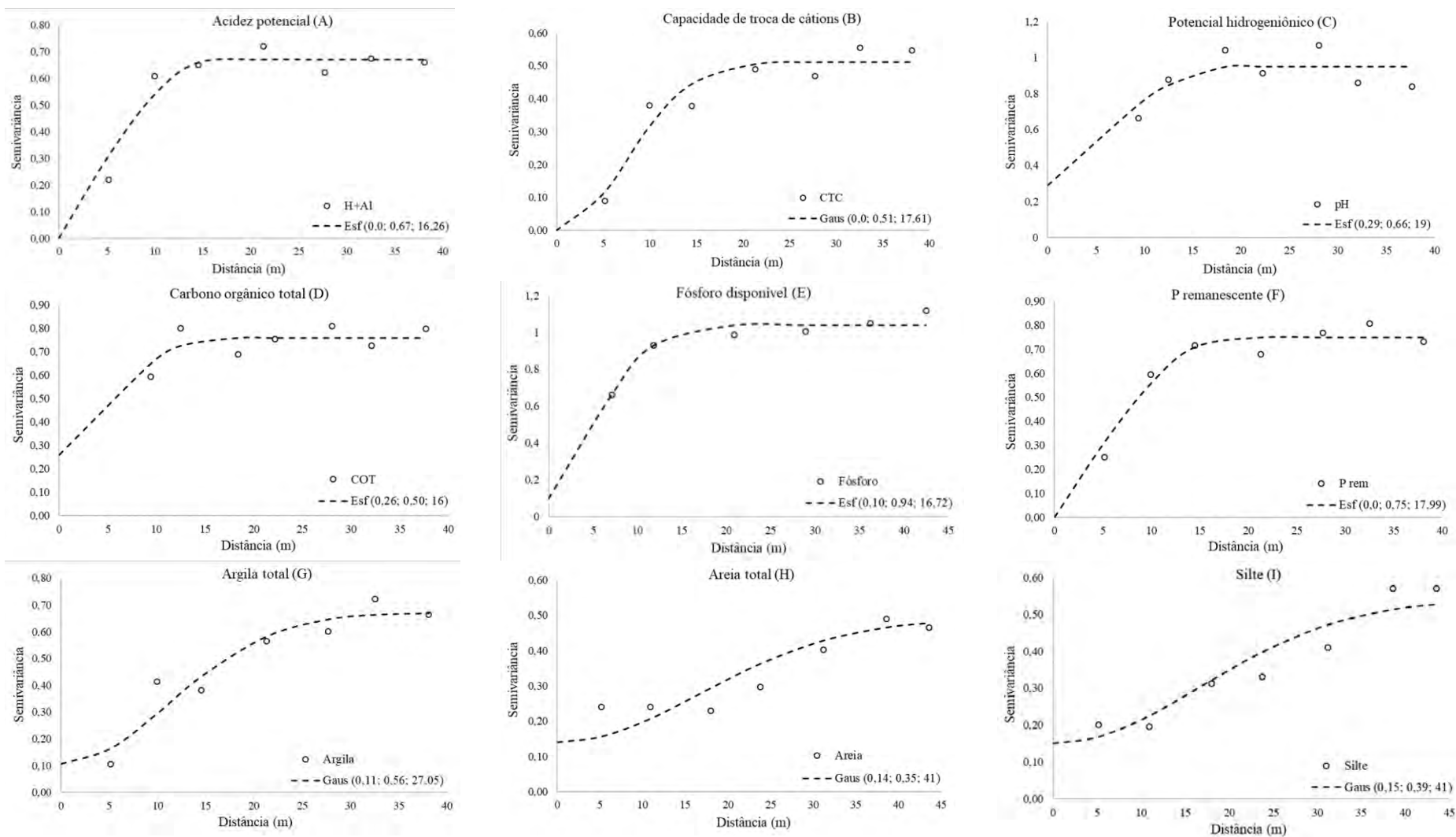


Figura 7. Semivariogramas dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,0-0,05 m.).

Em relação aos parâmetros do semivariograma para a profundidade de 0,05-0,10 m (Tabela 13 e Figura 8), observa-se que para as variáveis analisadas houve ajuste a algum modelo de semivariograma, indicando dependência espacial na área estudada, exceto para silte, que apresentou efeito pepita puro (EPP), o que indica variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada, no qual a aplicação da geoestatística não foi eficaz (CRUZ et al., 2010), sendo, assim, mais apropriado o uso da estatística clássica (AQUINO et al., 2014).

Para os demais atributos, nota-se que seis se ajustaram ao modelo esférico, excetuando-se os atributos H+Al (Figura 8A) e areia (Figura 8H), que se ajustaram ao modelo gaussiano. Observou-se que nas duas profundidades superficiais, os atributos pH, COT, P, P rem e areia se ajustaram ao mesmo modelo, ou seja, apresentaram o mesmo padrão de variabilidade espacial para ambas as profundidades.

Os atributos H+Al, e P rem não apresentaram efeito pepita, e os demais apresentaram valores baixos, repetindo o padrão verificado na camada superficial do solo, variando entre 0,01 (COT) e 0,22 (CTC), o que indica maior continuidade do fenômeno, menor variância da estimativa e maior confiança no valor estimado (VIEIRA, 2000) para a maioria dos atributos do solo.

Em relação ao alcance, observa-se que houve variação entre 14,50 m (COT) (Figura 8D e Tabela 13) e 41,0 (silte) (Figura 8I e Tabela 13). Vale destacar que o alcance do silte foi semelhante nas duas camadas superficiais (0,0-0,05 m e 0,05-0,10 m), o que indica que não há variabilidade vertical no solo para a variável na camada até 0,10 m. Sobre os coeficientes de determinação (R^2) (Tabela 8), os dados apresentaram ótimos ajustes para a maioria dos atributos. O R^2 variou entre 0,85 (P e argila) e 0,96 (P rem). Já o grau de dependência espacial (GDE) foi de 0 a 34%, o que indica que os atributos apresentam um máximo de 34% de aleatoriedade nos dados amostrais (Tabela 8). Seguindo a classificação de dependência espacial proposta por Cambardella et al. (1994), verifica-se que o GDE variou entre forte e moderado, repetindo o observado na camada superficial (0,0-0,05 m). Seis atributos apresentaram GDE forte, com 0,0 (zero) para H+Al e P rem, e, 8,8%, 1,5%, 9,5% e 13,0% para pH, COT, P e argila, respectivamente. Por outro lado, CTC e areia atingiram GDE moderado, com 34,9% e 40,4%. Portanto, a distribuição dos atributos no espaço não é aleatória, com exceção do silte, que apresentou EPP na camada 0,05-0,10 m (Figura 8I e Tabela 13).

Para a profundidade de 0,10-0,20 m, observou-se que todos os atributos apresentaram dependência espacial, uma vez que se ajustaram a algum dos modelos de semivariogramas (Tabela 13 e Figura 8). Com exceção do P, todos os atributos se ajustaram ao modelo esférico para esta profundidade do solo. Segundo Isaaks e Srivastava (1989), os modelos esféricos descrevem propriedades com alta continuidade espacial, ou menos erráticos na curta distância. De acordo com Grego e Vieira (2005), esse modelo é o que predomina nos trabalhos em ciência do solo. Não foi verificado efeito pepita para os atributos H+Al, CTC, pH e COT (Tabela 13). Além disso, as variáveis relacionadas a textura do solo (argila, areia e silte) apresentaram efeito pepita muito próximos de zero, com 0,6 para argila e 0,7 para areia e silte, ou seja, apresentaram pouca ou nenhuma variabilidade não explicada (CAMBARDELLA et al., 1994). Em relação ao alcance, verificou-se que houve variação entre 23,08 m (COT) (Figura 8D e Tabela 13) e 35,0 m (P e P rem) (Figura 8E e 8F e Tabela 13). Nessa camada de amostragem, os alcances foram muito próximos entre si para a maioria dos atributos, uma vez que sete atributos apresentaram alcances variando entre 33 m e 35 m. Para grau de dependência espacial (GDE) observa-se que sete atributos apresentaram GDE forte, sendo estes H+Al, CTC, pH, COT, argila, areia e silte. Já os atributos P e P rem apresentaram GDE moderado, atingindo 35,1% e 47,4%, seguindo classificação descrita por Cambardella et al. (1994).

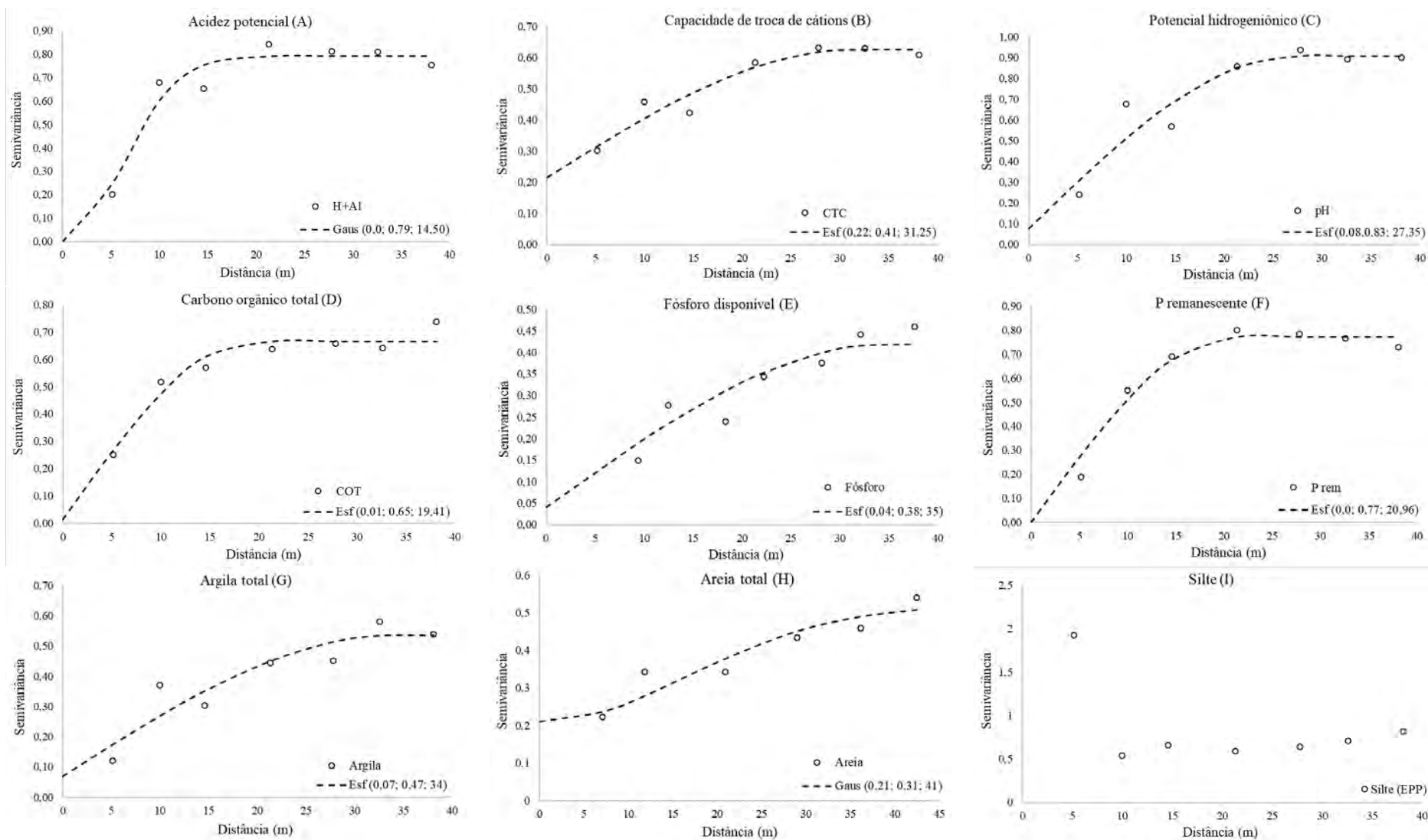


Figura 8. Semivariogramas dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,05-0,10 m.).

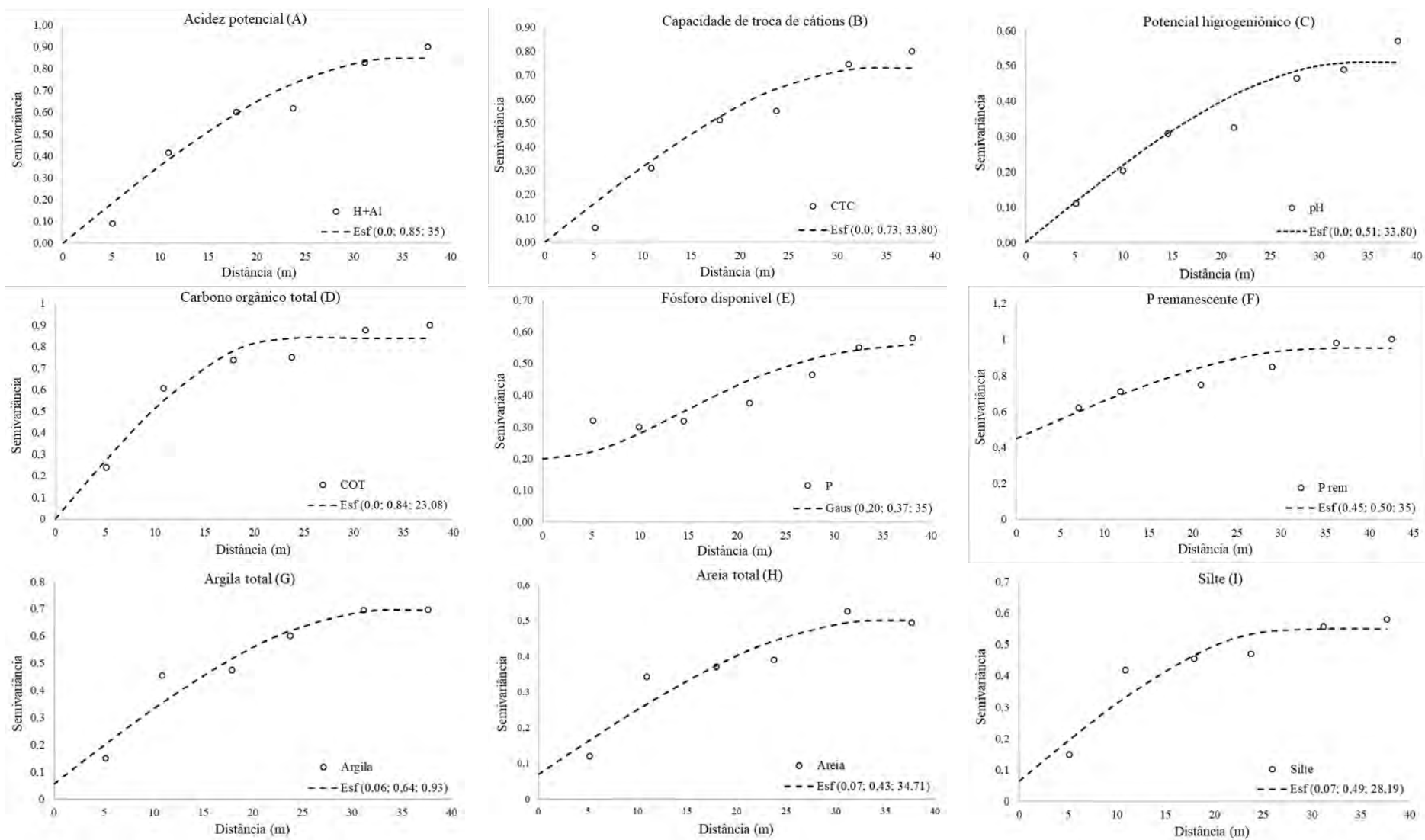


Figura 9. Semivariogramas dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,10-0,20 m.).

Os dados dos parâmetros dos semivariogramas dos atributos químicos e físicos do solo nas profundidades 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m estão apresentados na Tabela 13. Já os semivariogramas experimentais podem ser visualizados nas Figuras 10 e 11. Nas duas camadas mais profundas, todos os atributos apresentaram dependência espacial, se ajustando aos modelos esférico ou gaussiano. Vale destacar que COT e P rem se ajustaram ao mesmo modelo (esférico) em todas as profundidades estudadas, indicando um padrão de variabilidade ao longo do perfil do solo para estas variáveis.

Nas duas camadas mais profundas houve efeito pepita, com exceção da areia (0,20-0,40 m) (Figura 6H) e COT (0,40-0,60 m) (Figura 7D). Na camada 0,20-0,40 m, algumas variáveis apresentaram valores muito próximos de 0,0 (zero) (tabela 8), ou seja, com pouca variabilidade não explicada, seja decorrente de erros de medição ou de uma variação não detectada pela grade de amostragem (CAMBARDELLA et al., 1994). Na profundidade 0,20-0,40 m o efeito pepita variou de 0,02 (CTC) (figura 6B) a 0,20 (P) (Figura 6E). Já na camada 0,40-0,60 m, os valores situaram-se entre 0,03 (H+Al) (Figura 7A) e 0,32 (silte) (Figura 7I).

Em relação ao alcance, observa-se que houve variação entre 20,52 m (areia) e 35,0 (H+Al e P) para a camada 0,20-0,40 m. Já para 0,40-0,60 m, os alcances variaram de 17,12 (COT) a 42,13 (silte). Nota-se que a camada mais profunda atingiu maiores alcances em relação às camadas mais superficiais (tabela 8). O GDE na profundidade 0,20-0,40 m variou entre 0% (areia) e 36,4% (P). Já para 0,40-0,60 m, GDE variou entre 0% (COT) e 42,7% (areia), assim, foram classificados com GDE forte ou moderado (CAMBARDELLA et al., 1994).

Tabela 13. Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados dos atributos químicos e físicos do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,20-0,40 e 0,40-060 m. Seropédica, RJ, 2019.

Variável	Modelo	C0	C1	Patamar	Alcance	R ²	GDE
Profundidade 0,20 – 0,40 m							
H+Al	Esférico	0,18	0,46	0,64	35,00	0,81	28,1%
CTC	Gaussiano	0,02	0,65	0,67	21,41	0,94	3,0%
pH	Gaussiano	0,11	0,48	0,59	32,00	0,88	18,6%
COT	Esférico	0,03	0,65	0,68	25,69	0,93	4,4%
P	Gaussiano	0,20	0,35	0,55	35,00	0,90	36,4%
P rem	Esférico	0,04	0,62	0,66	36,00	0,97	6,1%
Argila	Gaussiano	0,03	0,55	0,58	21,05	0,98	5,2%
Areia	Gaussiano	0,00	0,53	0,53	20,52	0,96	0,0%
Silte	Gaussiano	0,09	0,76	0,85	27,06	0,93	10,6%
Profundidade 0,40 – 0,60 m							
H+Al	Esférico	0,03	0,98	1,01	38,00	0,91	3,0%
CTC	Gaussiano	0,27	0,57	0,84	38,00	0,94	32,1%
pH	Esférico	0,28	0,63	0,91	40,98	0,98	30,8%
COT	Esférico	0,00	1,12	1,12	17,12	0,87	0,0%
P	Esférico	0,20	0,35	0,55	35,00	0,90	36,4%
P rem	Esférico	0,19	0,53	0,72	40,00	0,86	26,4%
Argila	Gaussiano	0,20	0,48	0,68	41,00	0,84	29,4%
Areia	Gaussiano	0,30	0,42	0,72	40,00	0,90	41,7%
Silte	Gaussiano	0,32	0,63	0,95	42,13	0,90	33,7%

H+Al = Acidez potencial; CTC = Capacidade de troca de cátions; pH = Potencial hidrogeniônico; P = Fósforo disponível e P rem = Fósforo remanescente. C0 = Efeito pepita; C1 = Variância estrutural; R² = Coeficiente de determinação; GDE = Grau de dependência espacial (C0/(C0+C1)*100).

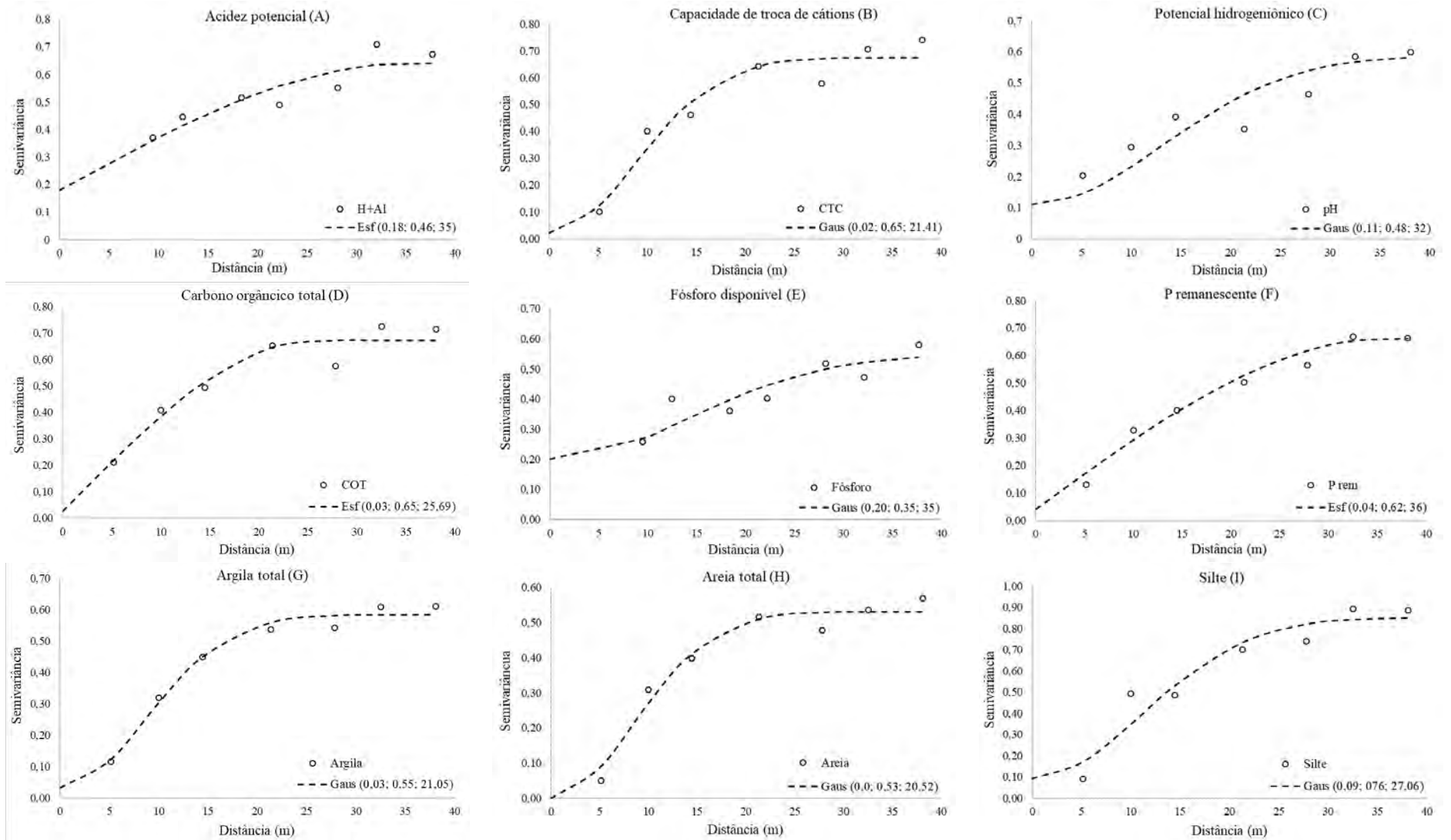


Figura 10. Semivariogramas dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,20-0,40 m.).

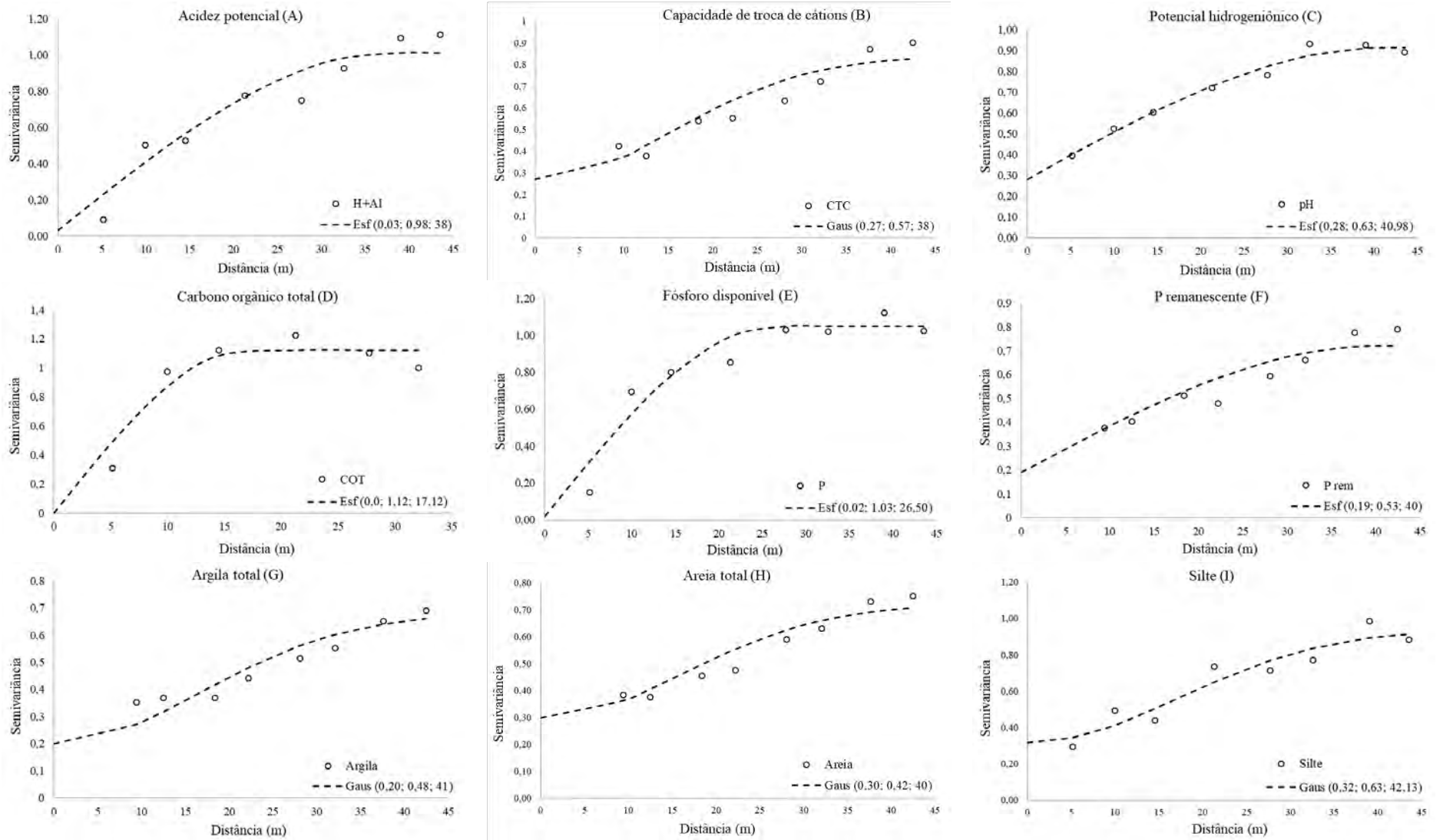


Figura 11. Semivariogramas dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças(Prof. 0,40-0,60 m.).

Os parâmetros dos semivariogramas das formas inorgânicas e orgânicas de P, P residual, Po total e P total, nas profundidades 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m estão sumarizados na Tabela 14. Já os semivariogramas são apresentados nas Figuras 12, 13 e 14. Em todas as profundidades avaliadas, as frações de Pi e Po, fração residual, Po total e P total apresentaram dependência espacial. Todas as variáveis ajustaram-se a algum modelo de semivariograma, ou seja, não houve efeito pepita puro para nenhuma das variáveis analisadas, indicando dependência espacial na área de estudo (CRUZ et al., 2010).

Tabela 14. Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,0-0,05 m; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Seropédica, RJ, 2019.

Variável	Modelo	C0	C1	Patamar	Alcance	R ²	GDE
Profundidade 0,0 – 0,05 m							
Pi bic	Esférico	0,0	0,33	0,33	30,68	0,95	0,0%
Pi H	Gaussiano	0,06	0,37	0,43	34,00	0,90	14,0%
Pi OH	Gaussiano	0,00	0,41	0,41	16,94	0,89	0,0%
Po bic	Esférico	0,00	0,98	0,98	23,89	0,90	0,0%
Po H	Gaussiano	0,00	0,85	0,85	17,77	0,89	0,0%
Po OH	Exponencial	0,19	0,58	0,77	29,46	0,95	24,7%
P residual	Gaussiano	0,00	0,49	0,49	18,93	0,90	0,0%
Po total	Esférico	0,00	0,84	0,84	21,30	0,75	0,0%
P total	Gaussiano	0,02	0,35	0,37	18,85	0,97	5,4%
Profundidade 0,05 – 0,10 m							
Pi bic	Gaussiano	0,0	0,25	0,25	33,45	0,97	0,0%
Pi H	Gaussiano	0,18	0,36	0,54	34,00	0,87	33,3%
Pi OH	Gaussiano	0,10	0,38	0,48	40,00	0,94	20,8%
Po bic	Esférico	0,00	0,75	0,75	23,04	0,91	0,0%
Po H	Esférico	0,00	0,75	0,75	27,29	0,94	0,0%
Po OH	Esférico	0,00	0,80	0,80	30,97	0,97	0,0%
P residual	Gaussiano	0,22	0,40	0,62	40,00	0,82	35,5%
Po total	Esférico	0,00	0,62	0,62	33,50	0,93	0,0%
P total	Gaussiano	0,10	0,38	0,48	38,00	0,94	20,8%
Profundidade 0,10 – 0,20 m							
Pi bic	Gaussiano	0,02	0,24	0,26	19,86	0,94	7,7%
Pi H	Gaussiano	0,07	0,33	0,40	31,70	0,94	17,5%
Pi OH	Gaussiano	0,29	0,30	0,59	40,00	0,67	49,2%
Po bic	Gaussiano	0,00	0,34	0,34	25,66	0,98	0,0%
Po H	Gaussiano	0,00	0,46	0,46	21,25	0,98	0,0%
Po OH	Esférico	0,01	0,64	0,65	31,16	0,98	1,5%
P residual	Gaussiano	0,00	0,40	0,40	16,08	0,93	0,0%
Po total	Gaussiano	0,00	0,42	0,42	23,26	0,97	0,0%
P total	Gaussiano	0,00	0,32	0,32	25,48	0,95	0,0%

Pi bic = P inorgânico lábil; Pi H = P inorgânico moderadamente lábil; P OH = Pi moderadamente resistente; Po bic = P orgânico lábil; Po H = P orgânico moderadamente lábil; P OH = P orgânico moderadamente resistente. C0 = Efeito pepita; C1 = Variância estrutural; R² = Coeficiente de determinação; GDE = Grau de dependência espacial (C0/(C0+C1)*100).

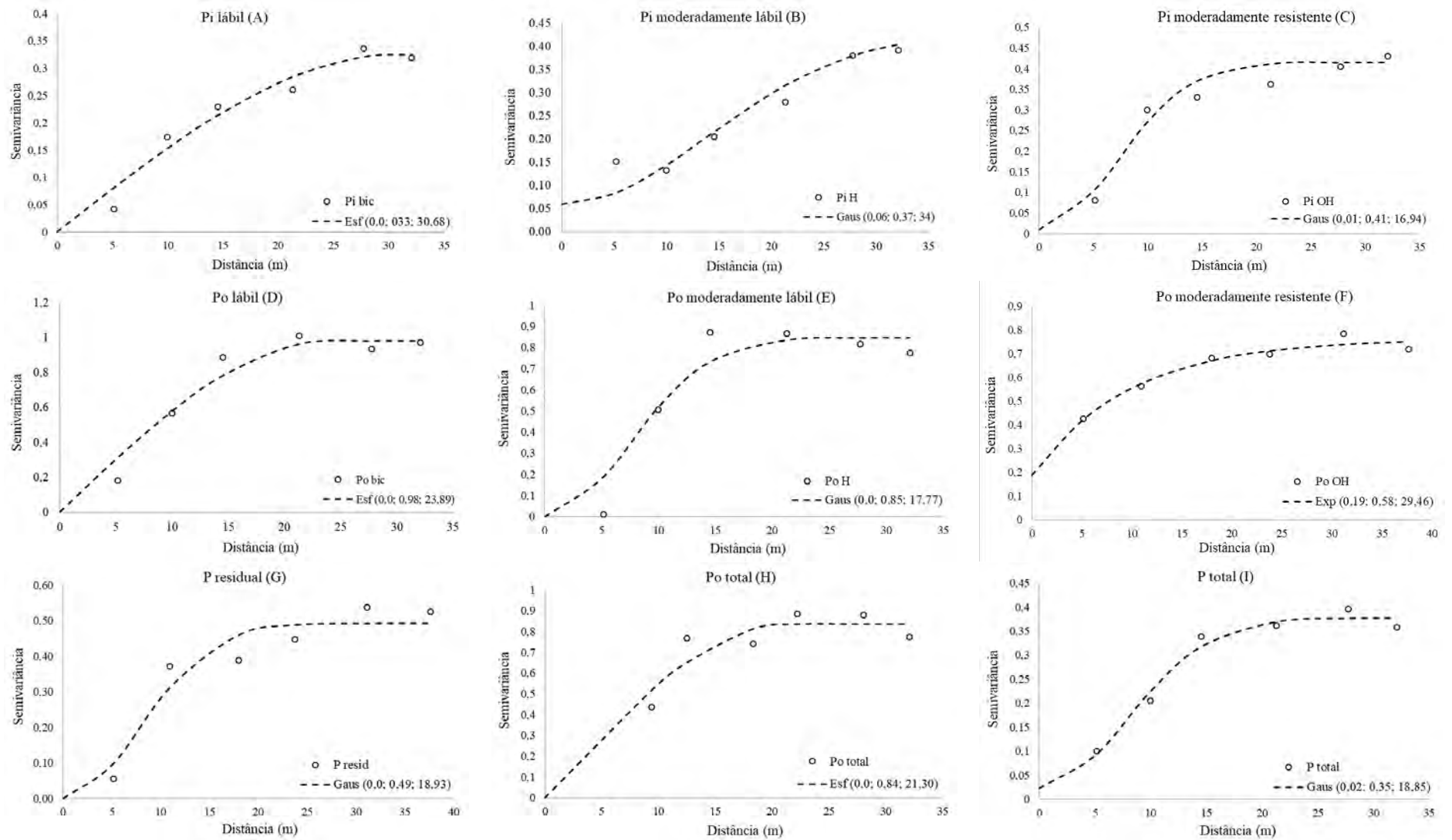


Figura 12. Semivariogramas das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,0-0,05 m.).

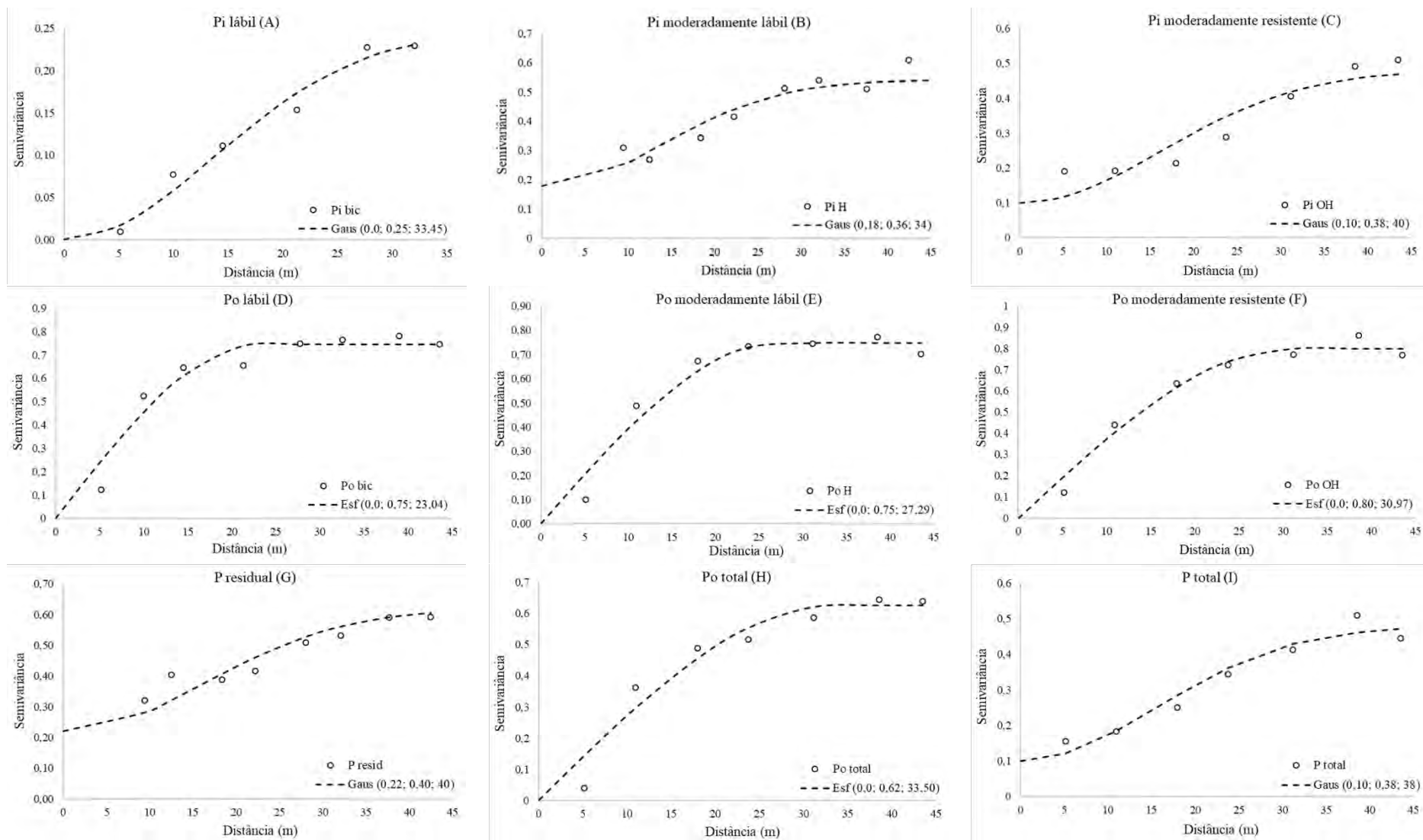


Figura 13. Semivariogramas das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,05-0,10 m.).

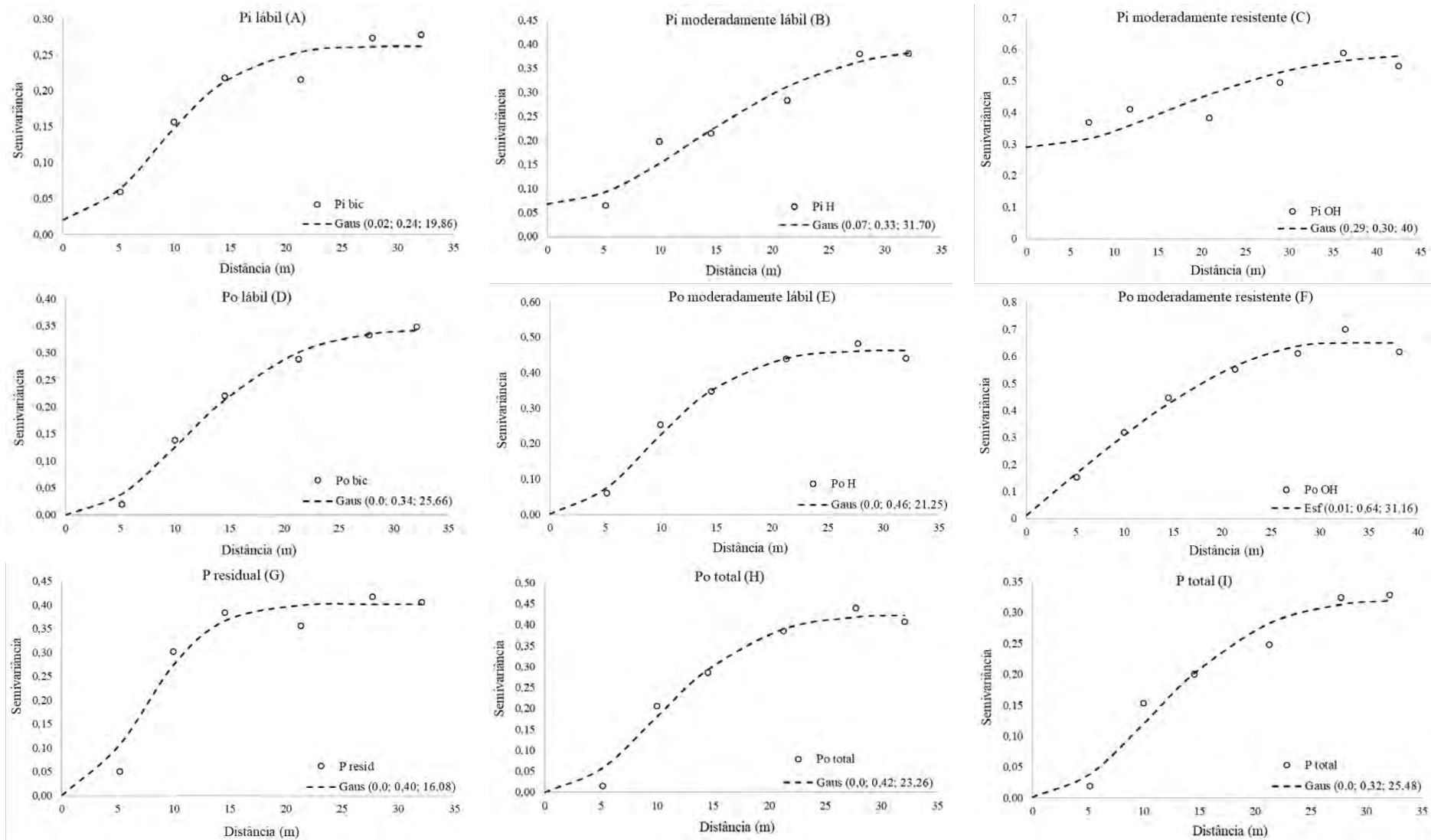


Figura 14. Semivariogramas das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,10-0,20 m.).

A falta de independência espacial no estudo denota que o comportamento dessas variáveis regionalizadas não foi aleatório e que as distâncias entre pontos utilizadas na malha geostatística foram suficientes para o estudo da variabilidade espacial (DALCHIAVON et al., 2012).

Na profundidade 0,0-0,05 m, a maioria das variáveis se ajustaram ao modelo gaussiano (Pi H, Pi OH, Po H, P residual, e P total). Já as variáveis Pi bic e Po bic se ajustaram ao esférico, e o P OH ao exponencial. Para camada 0,05-0,10 m, as frações de Pi se ajustaram ao modelo gaussiano. Por outro lado, o Po se ajustou ao esférico em todas as frações, e o P residual, Po total e P total se ajustaram a gaussiano, esférico e gaussiano, respectivamente. Na profundidade 0,10-0,20 m, com exceção do Po OH, que se ajustou ao modelo esférico, todas as demais variáveis se ajustaram ao modelo gaussiano (tabela 9).

Na profundidade 0,20-0,40 m as frações de Pi se ajustaram ao modelo gaussiano, já as frações de Po se ajustaram ao modelo esférico (Po bic e Po H) e gaussiano (Po OH). O P residual, Po total e P total se ajustaram ao modelo gaussiano (tabela 10). Já em relação a profundidade de 0,40-0,60 m, Pi bic e Po OH se ajustaram ao modelo esférico, e, as demais, ao modelo gaussiano. Portanto, o modelo gaussiano foi o que melhor representou a variabilidade espacial na área de estudo, independente da profundidade do solo.

No que diz respeito ao efeito pepita (C0), para todas as profundidades, a maioria das variáveis atingiram valores iguais ou próximos a 0 (zero). O efeito pepita é o valor da semivariância para distância zero e representa o componente da variação ao acaso (VIEIRA et al., 1983), ocasionada possivelmente, por erros de medições ou variações dos atributos que não podem ser detectados na escala amostral (SIQUEIRA et al., 2010). O C0 variou entre 0 (zero) (Pi bic, Pi OH, Po bic, Po H, P residual e Po total) e 0,19 (Po OH); 0 (zero) (Pi bic, Po nas três frações e Po total) e 0,22 (P residual); 0 (zero) (Po bic, Po H, P residual, Po total e P total) e 0,29 (Pi OH); 0 (zero) (Po bic e Po H) e 0,20 (P residual) e 0 (zero) (Pi bic, Pi OH, Po bic e Po OH) e 0,30 (Po H) para as profundidades 0,0-0,05; 0,05-0,010; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60, respectivamente (tabelas 9 e 10).

Em relação ao patamar, que é o valor da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor constante (AQUINO et al., 2014), nota-se que as variáveis apresentaram variância com amplitude de 0,33 (Pi bic) e 0,98 (Po bic); 0,25 (Pi bic) e 0,80 (Po OH); 0,26 (Pi bic) e 0,65 (Po OH); 0,34 (Pi H) e 0,77 (Po OH) e 0,52 (Pi H) e 1,02 (Po bic), para as profundidades 0,0-0,05; 0,05-0,010; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60, respectivamente (tabelas 9 e 10). Evidenciando que entre esses valores de amplitude a estacionaridade é real e contribui para a definição da variabilidade espacial dos pontos amostrados (MATIAS et al., 2015). Os modelos ajustados aos dados dos atributos são considerados transitivos, por possuírem patamar (SIQUEIRA et al., 2010). Ou seja, a partir de um determinado valor da distância entre amostras, não existe mais dependência espacial (a variância da diferença entre pares de amostras torna-se invariante com a distância (CAMPOS et al., 2009; SIQUEIRA et al., 2010; MATIAS et al., 2015). Segundo os autores citados acima, o patamar possibilita identificar a estacionaridade dos resultados dos pontos amostrados entre os pares de dados, tornando-se os valores constantes, confirmado pela semivariância que se aproxima da variância total dos dados.

Os resultados relacionados ao alcance para as profundidades de amostragem do solo estão sumarizados nas tabelas 9 e 10. Observa-se que os valores de alcance variaram entre 16,94 m (Pi OH) e 34 (Pi H), na profundidade 0,0-0,05 m; 23,04 m (Po bic) e 40 m (Pi OH e P residual) para profundidade 0,05-0,10 m; 16,08 m (P residual) e 40 m, na profundidade 0,10-0,20 m; 14,03 m (Po H) e 37,45 m (Pi OH) na profundidade 0,20-0,40, e 16,31 m (Pi OH) e 41,68 m (P total), sendo que, entre as frações, o maior alcance foi verificado no Pi H, na camada mais profunda de amostragem do solo (0,40-0,60 m). De maneira geral, os maiores

alcances foram observados na camada 0,5-0,10 m para as frações de P inorgânicas e orgânicas, fração residual de P, Po total e P total (Tabelas 14 e 15; Figuras 12 a 16).

Maiores valores de alcance tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representam melhor a realidade (CORÁ et al., 2004), uma vez que o parâmetro indica a zona de influência de uma amostra, ou seja, define a distância máxima até onde o valor de uma variável possui relação de dependência espacial com o seu próximo (GUERRA, 1988). Desta forma, todos os vizinhos situados dentro de um círculo com os raios supracitados podem ser usados para estimar valores para qualquer ponto entre eles (VIEIRA; LOMBARDI NETO, 1995).

Em relação ao GDE, verificou-se que para as profundidades 0,0-0,50 m; 0,05-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m houve variação entre 0% e 24%; 0% e 35%; 0% e 49%; 0% e 31%, e 0% e 37%, respectivamente. Portanto, a maior aleatoriedade foi observada no Pi OH, na camada de 0,10-0,20 m. Na área de estudo, as distribuições das frações de P no espaço não são aleatórias, uma vez que todos apresentaram valores moderados ou fortes para o grau de dependência espacial, demonstrando que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais (MATIAS et al., 2015), em todo perfil do solo.

Nota-se que a maior parte das frações de P foram classificadas com dependência espacial forte. A forte dependência espacial é intensamente influenciada por propriedades intrínsecas do solo, como textura e mineralogia, já aqueles que apresentaram fraca dependência recebem maior influência de fatores externos, devido a aplicações de fertilizantes, preparo e cultivo do solo (CAMBARDELLA et al., 1994; SOUZA et al., 2010).

Tabela 15. Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo do Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, nas profundidades 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. Seropédica, RJ, 2019.

Variável	Modelo	C0	C1	Patamar	Alcance	R ²	GDE
Profundidade 0,20 – 0,40 m							
Pi bic	Gaussiano	0,02	0,4	0,42	15,16	0,83	4,8%
Pi H	Gaussiano	0,06	0,28	0,34	30,00	0,86	17,6%
Pi OH	Gaussiano	0,13	0,39	0,52	37,45	0,96	25,0%
Po bic	Esférico	0,00	0,65	0,65	21,12	0,91	0,0%
Po H	Esférico	0,00	0,6	0,60	14,03	0,64	0,0%
Po OH	Gaussiano	0,19	0,58	0,77	29,46	0,95	24,7%
P residual	Gaussiano	0,20	0,44	0,64	32,00	0,90	31,3%
Po total	Gaussiano	0,03	0,49	0,52	16,87	0,95	5,8%
P total	Gaussiano	0,06	0,36	0,42	19,52	0,93	14,3%
Profundidade 0,40 – 0,60 m							
Pi bic	Esférico	0	0,91	0,91	24,23	0,87	0,0%
Pi H	Gaussiano	0,03	0,49	0,52	40,00	0,86	5,8%
Pi OH	Gaussiano	0,00	0,86	0,86	16,31	0,93	0,0%
Po bic	Gaussiano	0,00	1,02	1,02	17,11	0,93	0,0%
Po H	Gaussiano	0,30	0,5	0,80	26,00	0,96	37,5%
Po OH	Esférico	0,00	0,97	0,97	23,66	0,89	0,0%
P residual	Gaussiano	0,11	0,49	0,60	18,83	0,87	18,3%
Po total	Gaussiano	0,05	0,83	0,88	25,49	0,96	5,7%
P total	Gaussiano	0,04	0,62	0,66	41,68	0,95	6,1%

Pi bic = P inorgânico lábil; Pi H = P inorgânico moderadamente lábil; P OH = Pi moderadamente resistente; Po bic = P orgânico lábil; Po H = P orgânico moderadamente lábil; P OH = P orgânico moderadamente resistente. C0 = Efeito pepita; C1 = Variância estrutural; R² = Coeficiente de determinação; GDE = Grau de dependência espacial (C0/(C0+C1)*100).

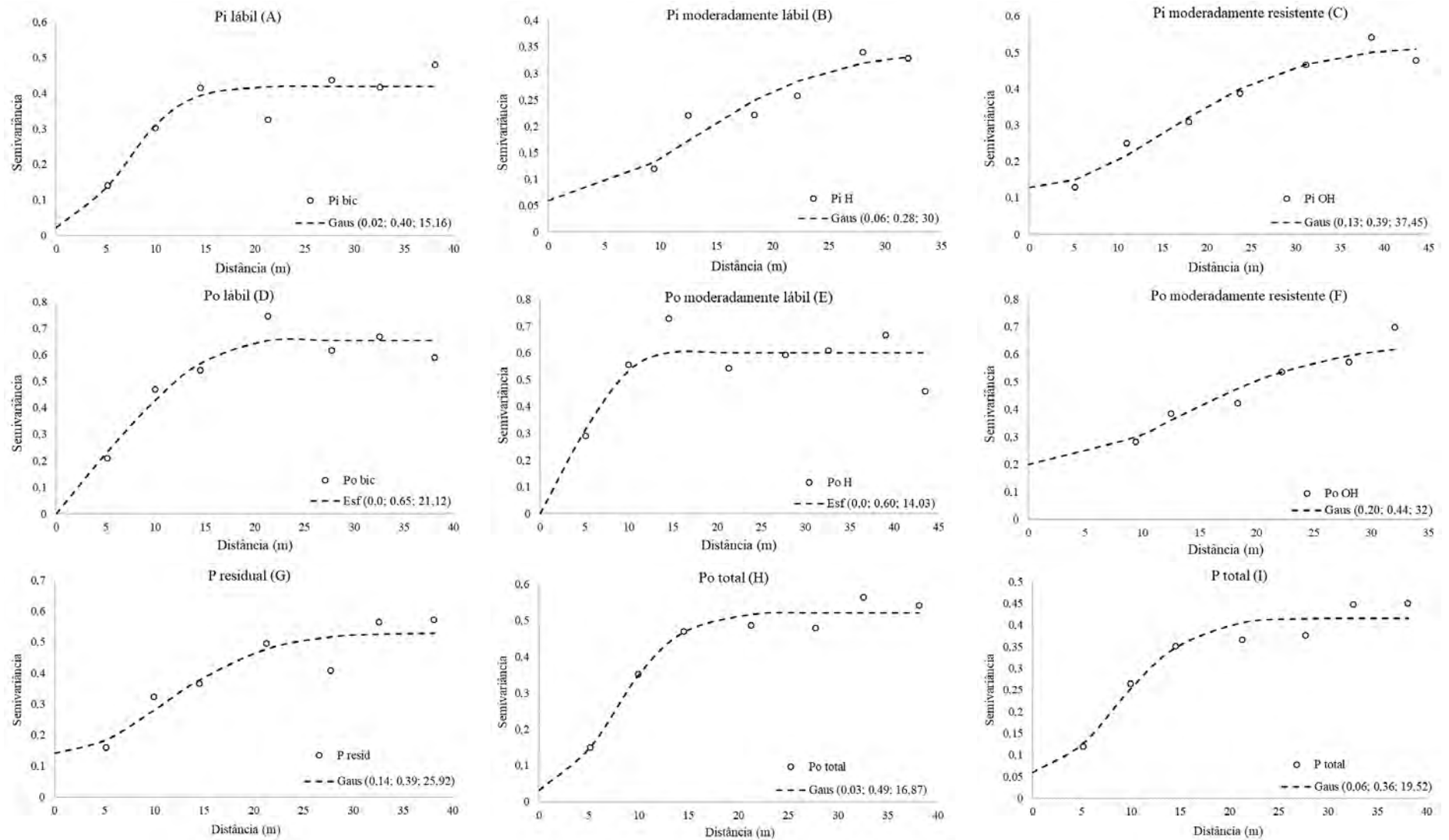


Figura 15. Semivariogramas das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,20-0,40 m.).

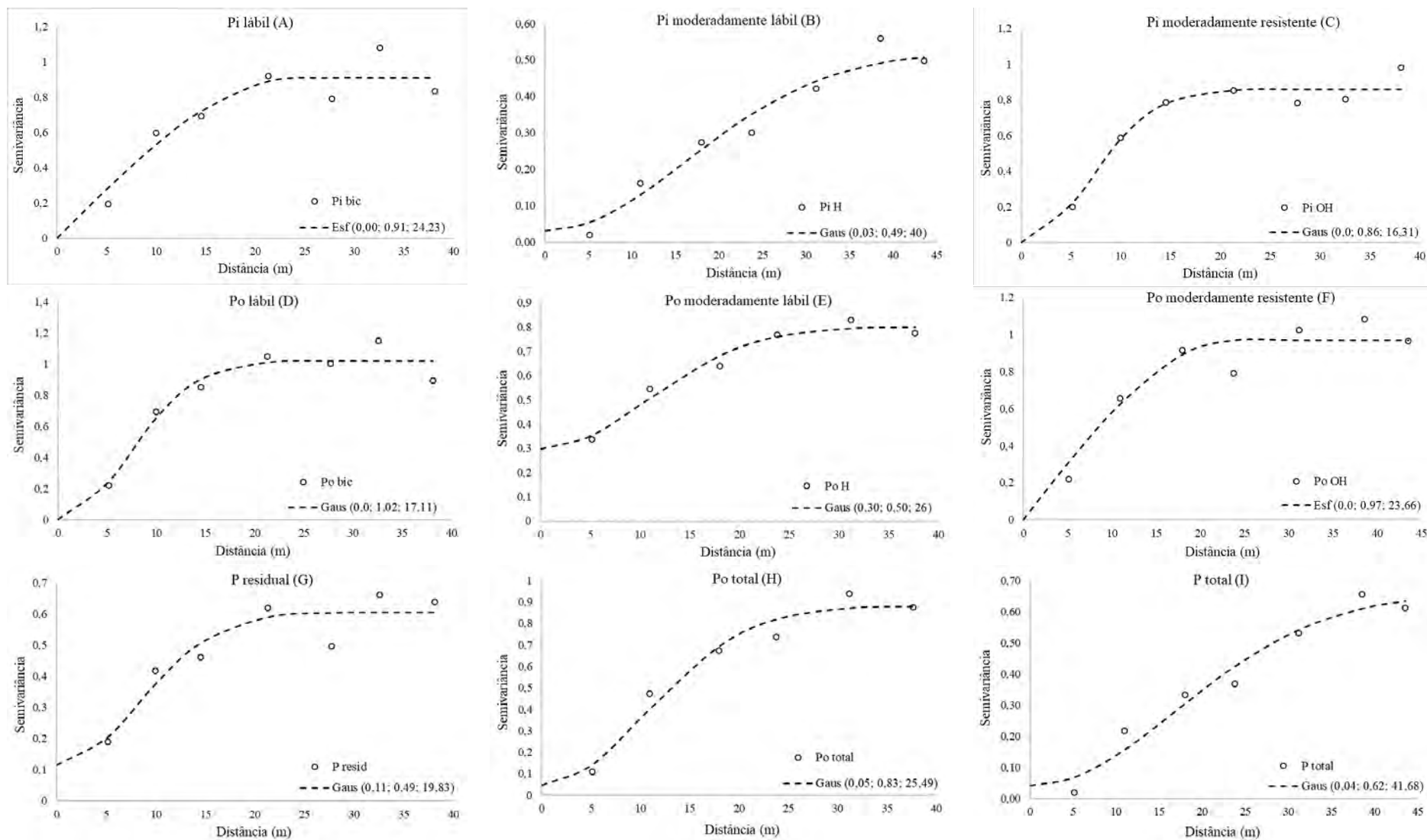


Figura 16. Semivariogramas das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças (Prof. 0,40-0,60 m.).

4.5.3 Mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo

A forma de se visualizar áreas que possuem variabilidade espacial comprovada é mediante mapas de isolinhas, obtidos através da interpolação dos dados, pelo método da krigagem ordinária. As linhas fechadas e próximas caracterizam área com maior variabilidade, enquanto a presença de linhas espaçadas é condição de uma variabilidade menor (SILVA; CHAVES, 2001). Segundo Oliveira et al. (1999), o conhecimento dos valores do alcance e as localizações das áreas onde estão concentrados os maiores e/ou menores valores de determinada variável, são importantes para o planejamento do manejo da fertilidade do solo, tanto na agricultura convencional como na agricultura de precisão. Nas Figuras 17, 18, 19, 20 e 21 estão apresentados os mapas de variabilidade espacial para os atributos químicos e físicos do solo no módulo experimental de cultivo orgânico de hortaliças, nas profundidades 0,0-0,05 m; 0,05-0,010 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m.

Na profundidade superficial (0,0-0,05 m), os valores verificados variaram, de acordo com as classes de interpretação de fertilidade do solo proposta por Alvarez et al. (1999), entre muito baixo e alto; médio e bom; baixo e muito alto (acidez média a alcalinidade fraca); baixo e bom, e bom e muito bom para os atributos H+Al, CTC, pH, COT e P disponível, respectivamente. Já para P rem, seguindo a classificação proposta por Alvarez et al. (2000), verificou-se variação de média a baixa adsorção de P no solo. Para análise dos dados de granulometria, foi utilizado o triângulo para classificação das classes texturais do solo, adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Nota-se que há um predomínio da classe textural areia, sendo possível detectar que a classe textural pode variar de areia, areia franca e franco arenosa, corroborando os resultados observados por Mata (2012), na mesma área de estudo.

Para H+Al, os valores variaram entre 1,0 e 6,52 $\text{Cmol}_c \text{dm}^{-3}$, sendo os maiores teores observados na porção extrema inferior do mapa (área de produção de biomassa), e com algumas manchas de valores mais levados nas laterais do mapa (Figura 17A), tanto na porção do subsistema tomate/telado (ao norte), quanto no policultivo (área central do mapa). Em relação a CTC (Figura 17B), o módulo apresenta variação entre 4,21 e 11,61 $\text{Cmol}_c \text{dm}^{-3}$, com maiores valores nas porções norte e na extremidade da face sul (à esquerda) do mapa. Vale destacar que estas áreas apresentaram os maiores teores de argila (Figura 17G), bem como de COT (Figura 17D), na cada mais superficial do solo. Para pH (Figura 17C), houve variação entre 5,20 e 7,90, com pequenas manchas de valores mais elevados ocorrendo nos três subsistemas do módulo, principalmente na porção inferior/ao centro do subsistema policultivo. Por outro lado, os menores valores foram observados ao sul do mapa, corroborando os resultados verificados por Pian (2019), na mesma área de estudo.

A distribuição das formas de P depende de várias propriedades do solo, entre as quais se destaca o pH (TOKURA et al., 2002). Lindsay e Moreno (1960) utilizando diagramas de solubilidade de compostos fosfatados, em razão do pH para estudos da química de P no solo, mostraram que a solubilidade de P é controlada por fosfato de cálcio em pH acima de sete, e por fosfato de ferro e alumínio, em pH inferior a sete. Os teores de COT variaram entre 6,9 e 39,10 g kg^{-1} (Figura 17D). Os maiores valores foram observados na porção norte do mapa, correspondente ao subsistema tomate/telado. Nota-se pequenas manchas de teores elevados na área de transição entre os sistemas policultivo e Gliricídia/Capineira (G/C), e também na extremidade sul do mapa (G/C). O COT é um indicador indireto da matéria orgânica do solo (MOS) (PIAN, 2019). A MOS desempenha papel ambivalente na adsorção de P, uma vez que ela tanto pode adsorver o P como também bloquear os sítios de adsorção que ocorrem nas superfícies das argilas e dos óxidos de ferro e alumínio (SANYAL; De DATTA, 1991; CHAVES et al., 2007). A redução da adsorção de P tem sido atribuída à ação do ácido carbônico sobre a solubilização de minerais contendo fósforo; à formação de complexos com

o húmus, fazendo com que o P possa ser absorvido pelas plantas; ao aumento da competição entre ânions orgânicos e o fosfato pelos sítios de adsorção de P; e pela formação de camadas de húmus ao redor dos óxidos de Fe e Al, diminuindo o poder de adsorção desses óxidos (ANDRADE et al., 2001; AQUINO, 2004; CHAVES et al., 2007). Em contrapartida, a capacidade da MO de adsorver o P, se deve, principalmente, ao caráter aniônico, que possibilita a formação de pontes de cátions com o Al, Fe e Ca a ela adsorvidos, e, por meio dessas pontes, o P seria adsorvido (SANYAL; De DATTA, 1991).

Para P disponível, verifica-se variação entre 240,3 e 963 mg dm⁻³, ou seja, concentrações muito altas, com os teores mais elevados na área de policultivo (figura 13E), área essa que recebe constante fertilização. Observa-se ainda uma mancha (em linha) que percorre todo o sistema G/C, mais especificamente, na linha de capineira.

O mapa de distribuição espacial de P rem pode servir como importante ferramenta para se conhecer a localização de áreas com maior e menor disponibilidade de fósforo (DONOGEMMA et al., 2008). Em relação ao P rem, nota-se que este variou entre 29,26 e 38,85 mg kg⁻¹. Os maiores valores foram observados nas porções norte e central do mapa, principalmente à direita dessas áreas (Figura 17F). De maneira geral, os teores de P rem foram maiores nas porções onde se observaram maior teor de COT. A quantidade de P que permanece na solução depende da atuação combinada da concentração de P adicionada e do tempo de contato (ALVAREZ et al., 2001) e da capacidade de adsorção de fosfatos do solo, que, por sua vez, é dependente da quantidade de MO, da textura e da mineralogia da fração argila (NOVAIS; SMYTH, 1999). Quanto maior a quantidade de MO, em geral menor é a adsorção de fosfatos e maior é o P rem, uma vez que ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como malato, oxalato e citrato, podem bloquear sítios de adsorção do fosfato (SILVA et al., 1997; BHATTI et al., 1998; DONAGEMMA et al., 2008).

No que diz respeito a granulometria do solo, observa-se que os teores variaram de 1,60% e 20,26%; 72,95% e 93,41% e 2,88% e 14,27%, para argila, areia e silte, respectivamente. Os teores de argila foram maiores na porção extrema esquerda, parte inferior do mapa (Figura 17G). Também se nota quantidades elevadas de argila na porção norte do mapa, ou seja, no subsistema tomate/telado. A areia apresentou maiores quantidades nas porções sul e central do mapa (Figura 17H), por outro lado, nota-se pouca areia ao norte do mapa. Para silte, os maiores teores foram verificados nas porções norte e central do mapa (Figura 17I). Vale destacar os mapas de argila e areia, que são claramente contrastantes. Nas áreas com menores teores de argila, há um claro preenchimento de quantidades mais altas de areia. Segundo Souza et al. (2004), as frações do solo geralmente apresentam comportamento inverso, principalmente de distribuição, pois, como são medidos em porcentagem, quando há acréscimo de um ocorre redução de outro.

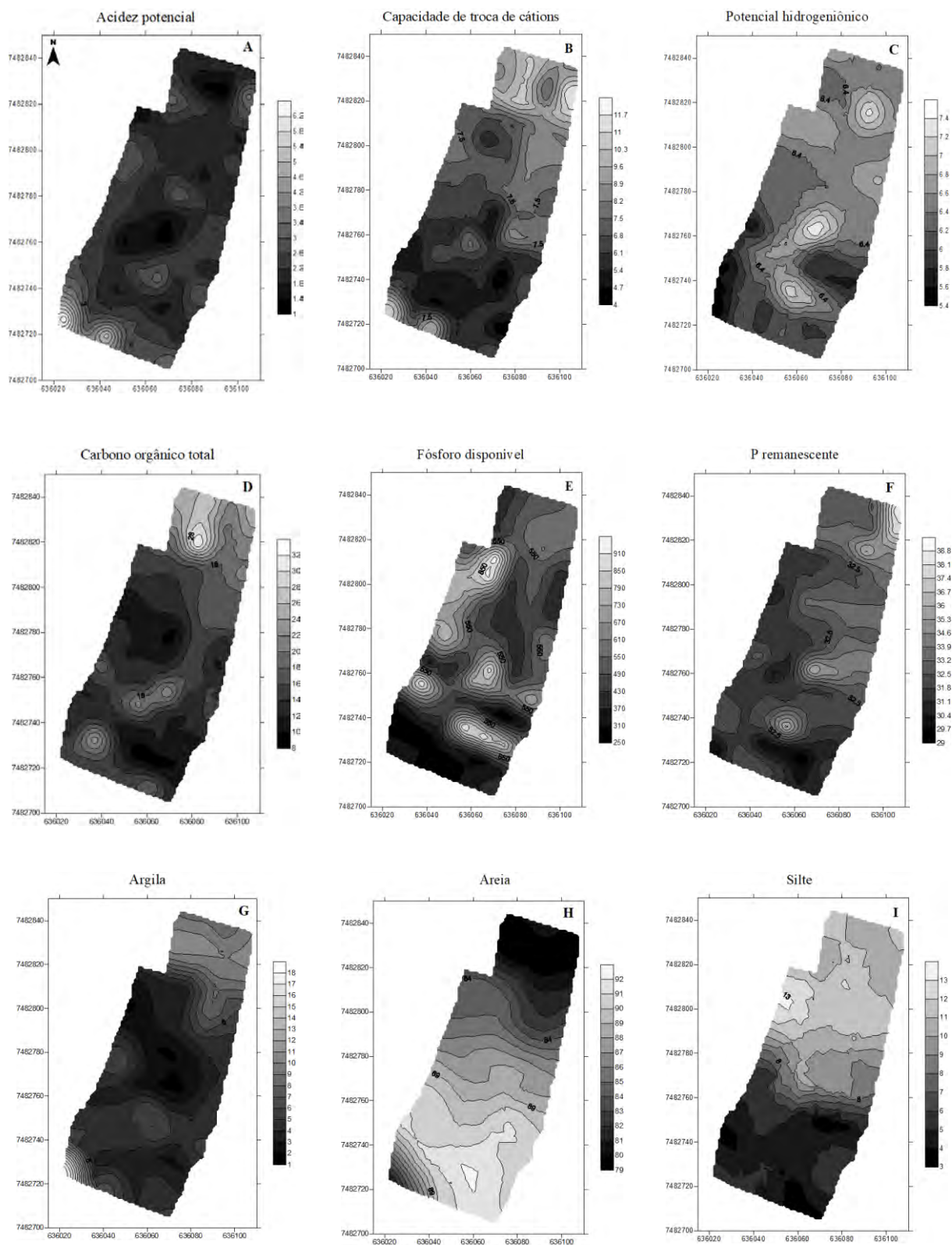


Figura 17. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,0-0,05 m. Seropédica, RJ, 2019.

Os mapas de variabilidade espacial para atributos do solo, na profundidade 0,05-0,10 m são apresentados na Figura 18. Os valores obtidos variaram entre médio e alto; médio e bom; baixo (acidez média) e muito alto (alcalinidade fraca); baixo e bom, e bom e muito bom para os atributos H+Al, CTC, pH, COT e P disponível, respectivamente, de acordo com as classes de interpretação de fertilidade do solo (ALVAREZ et al., 1999). Para P rem, observou-se variação entre as classes média e baixa adsorção de P, segundo classificação proposta por Alvarez et al. (2000). Já para granulometria, houve o mesmo padrão de distribuição entre as frações verificado na camada superficial de amostragem do solo.

Para H+Al (Figura 18A), houve variação de 2,62 a 7,60 $\text{Cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na área estudada, com manchas de teores mais elevados em toda extensão do módulo experimental de cultivo orgânico de hortaliças, principalmente na porção sul do mapa, que corresponde a área de C/G. Já para CTC (Figura 18B), verifica-se variação entre 5,49 e 14,15 $\text{Cmol}_c \text{dm}^{-3}$, sendo os maiores valores observados na porção norte do mapa, ou seja, na área de tomate/telado. Verificou-se, ainda, uma pequena mancha de valores altos na extremidade sul (à esquerda). Contudo, a maior porção do sul do mapa apresentou os menores valores de CTC. Cabe ressaltar que, assim como ocorreu na camada superficial do solo, os maiores valores de CTC foram verificados nas mesmas regiões que apresentaram teores mais elevados de COT (Figura 18D) e argila (Figura 18G). Segundo Santos et al. (2009), as diferenças encontradas na CTC são decorrentes dos diferentes tipos e teores de minerais argilosos que predominam na fração argila e da natureza e teor de matéria orgânica. Portanto, explica o padrão de distribuição semelhantes entre si para CTC, COT e argila.

Em relação ao pH (Figura 18C), verificou-se variação entre 4,60 e 7,10, com valores elevados nas porções norte e ao centro do mapa. Contudo, nota-se uma mancha com os valores mais elevados na área de transição entre o subsistema policultivo e G/C. Na área de G/C, também foram observadas manchas representando os menores valores de pH. Os menores valores na área de G/C (produção de biomassa) corroboram com os achados de Pian (2019), que, ao avaliar a variabilidade espacial do pH durante três anos consecutivos, observou uma nítida diferença entre os subsistemas dedicados à produção intensiva de hortaliças (policultivo, tomate/telado) que concentraram as classes superiores de pH, e os subsistemas dedicados a produção de biomassa vegetal (G/C), que concentraram as classes inferiores.

Para COT (Figura 18D), os teores no solo estudado variaram entre 8,50 e 40,0 g kg^{-1} , tendo sido observado os maiores teores nas áreas tomate/telado, seguido do subsistema policultivo. Nota-se, ainda, teores altos de COT na parte extrema do sul do mapa. Em relação ao P disponível (Figura 18E), os teores variaram entre 26,78 e 351,71 mg dm^{-3} . As maiores concentrações de P foram verificadas nas porções norte e central do mapa. Em contrapartida, a área G/Cao sul do mapa apresentou os menores teores de P disponível.

Em relação ao P rem (Figura 18F), os valores situaram-se entre 20,67 e 44,24 mg kg^{-1} , sendo observado ocorrência de pequenas manchas de valores mais elevados em toda a extensão do mapa. Nota-se, também, uma área com teores elevados e menor variação entre os valores, ao norte do mapa (na face esquerda). Na área de tomate/telado, na face direita, foram observados os menores teores de P rem, contratando o mapa para a variável na camada superficial do solo (0,0-0,05 m) (Figura 18F).

Para a granulometria (Figura 18, partes G e H), observa-se variação entre 3 e 18% e 72 e 94% para argila e areia, respectivamente. Já o silte não apresentou dependência espacial na profundidade 0,05-0,10 m (efeito pepita puro). Para argila e areia, observa-se o mesmo padrão de variabilidade espacial para as duas camadas mais superficiais do solo. Portanto, os teores de argila foram maiores na porção extrema esquerda, parte inferior do mapa e na porção norte do mapa, ou seja, no subsistema tomate/telado. A areia apresentou maiores quantidades nas

porções sul e central do mapa, por outro lado, nota-se pouca areia ao norte do mapa, bem como na extremidade esquerda, ao sul do mapa.

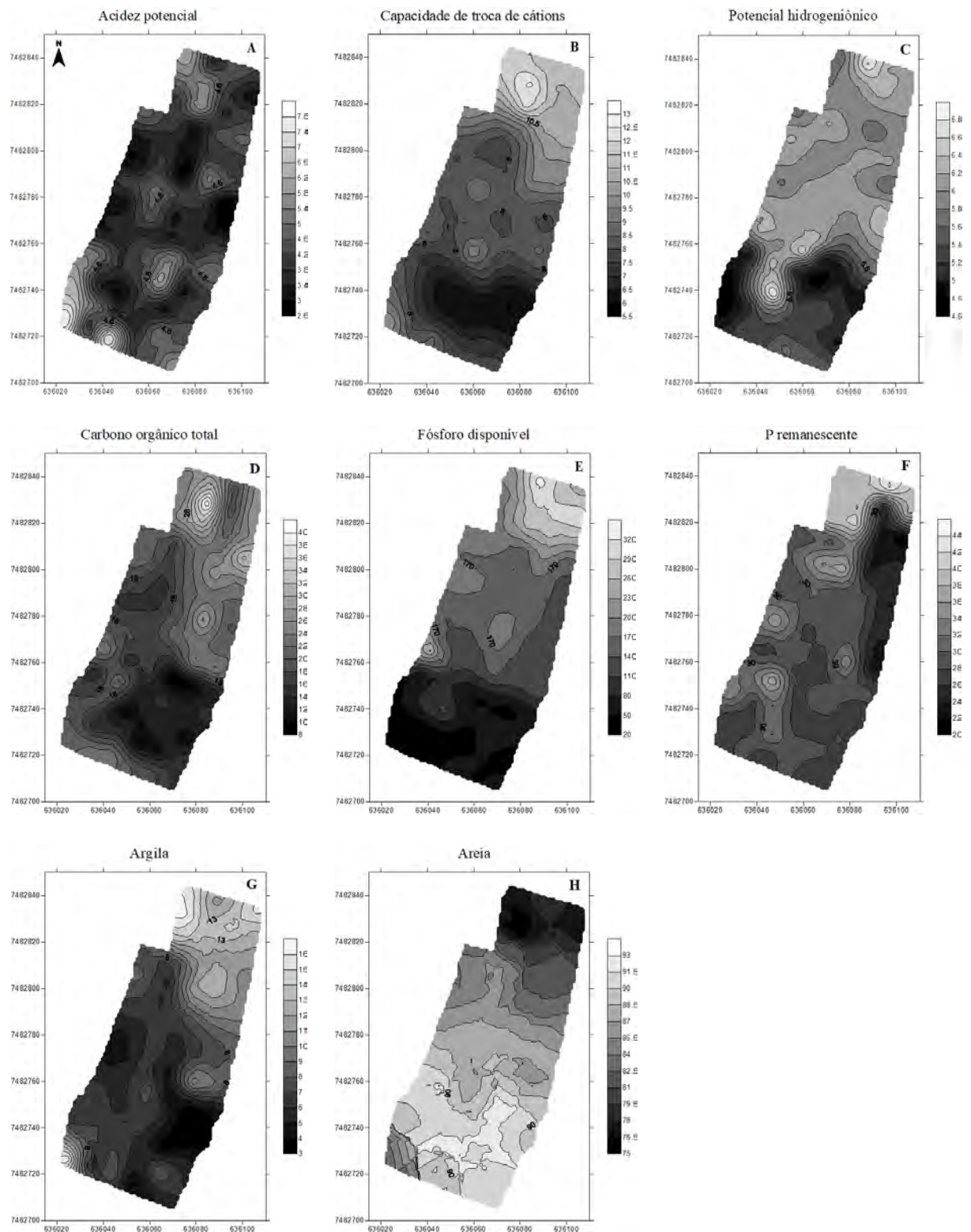


Figura 18. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,05-0,10 m. Seropédica, RJ, 2019.

Nas Figuras 19 e 20 estão apresentados os mapas de variabilidade espacial para atributos químicos e físicos do solo do módulo experimental de cultivo orgânico de hortaliças, nas profundidades 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente. Para a profundidade 0,10-0,20 m os valores obtidos foram classificados de muito baixo a alto, baixo a bom, baixo (acidez elevada) a alto (alcalinidade fraca), médio e bom e bom e muito bom (ALVAREZ et al 1999), para os atributos H+Al, CTC, pH, COT e P disponível, respectivamente. O P rem situou entre as classes alta e baixa capacidade de adsorção de P (ALVAREZ et al., 2000).

Para profundidade 0,20-0,40 m, (Figura 19), os valores para os atributos do solo situaram-se entre baixo e alto, baixo e bom, muito baixo (acidez muito elevada) e alto (acidez fraca), muito baixo e médio, bom e muito bom e com capacidade de adsorção de P entre alta e baixa, para H+Al, CTC, pH, COT, P e P rem, respectivamente. Já para granulometria, nas duas profundidades subsuperficiais (0,10,0-20 m e 0,20-0,40 m) observou-se um aumento de argila em função da profundidade do solo, bem como da fração silte. Contudo, a fração areia continuou sendo a mais presente no solo em estudo para ambas as profundidades.

Na profundidade 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m os atributos H+Al, CTC e pH (Figuras 19 e 20, partes A, B e C cada) apresentaram padrão de variabilidade espacial semelhante. Na camada 0,10-0,20, H+Al, CTC e pH variaram entre 0,83 e 6,20 $\text{Cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, 2,01 e 8,67 $\text{Cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e 4,50 e 6,70, respectivamente. Já na profundidade 0,20-0,40 m, a variação ocorreu entre 1,10 e 6,20 $\text{Cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, 2,41 e 8,69 $\text{Cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e 4 e 6,80, para H+Al, CTC e pH, respectivamente. Em ambas as profundidades os maiores valores para H+Al foram observados no subsistema G/C, por outro lado, os valores mais baixos ocorreram, principalmente, na área de policultivo. Já para CTC, os teores mais elevados foram obtidos nas porções norte (tomate/telado) e sul do mapa (G/C), com a área de policultivo apresentando os menores valores para este atributo, nas duas profundidades. O pH concentrou os valores mais elevados na porção superior do mapa (norte) e na parte central, correspondente ao subsistema policultivo. Já os valores mais baixos de pH ocorreram ao sul do mapa (G/C), repetindo o padrão de variabilidade das camadas superficiais do solo.

O COT na camada de 0,10-0,20 m (Figura 19D) apresentou variação entre 8,50 e 40 kg^{-1} . Notam-se manchas pequenas indicando maiores teores nas áreas de tomate/telado e policultivo (norte e centro do mapa, respectivamente), indicando alta variabilidade espacial em pontos próximos entre si, uma vez que apresenta muitas linhas fechadas, principalmente, nas porções com teores mais elevados. Verifica-se, também, manchas indicando menores teores de COT concentradas na área de policultivo (porção média do mapa). Já para camada 0,20-0,40 m (Figura 20D), o COT variou entre 0,30 e 11,28 g kg^{-1} , indicando uma significativa variabilidade vertical para este atributo, uma vez que houve um decréscimo abrupto em relação às camadas mais superficiais de amostragem do solo.

Notam-se teores mais elevados de COT concentrados nas áreas de produção de hortaliças, ou seja, área de tomate/telado e policultivo, porções norte e central do mapa, respectivamente. Os menores teores estão na porção inferior do mapa, que corresponde ao subsistema destinado a produção de biomassa vegetal, que por sua vez, é exportada para as áreas de produção das hortaliças (tomate/telado e policultivo), o que pode explicar o padrão de variabilidade de COT no solo.

Em relação ao P disponível na camada de 0,10-0,20 m, houve variação entre 24 e 433,20 mg dm^{-3} (Figura 19E). Verificou-se um padrão de variabilidade espacial, em que os teores de P diminuíram no sentido norte-sul. O mapa apresenta linhas espaçadas, principalmente nos subsistemas policultivo e G/C, indicando uma condição de menor variabilidade espacial entre pontos vizinhos (SILVA; CHAVES, 2001). Já na camada de 0,20-0,40 m, o P disponível variou de 19,10 a 153,70 g kg^{-1} , com os maiores teores nas porções norte e média do mapa. Já a porção sul do mapa apresenta os menores teores, que foram mais homogêneos considerando os pontos próximos entre si, diferente das demais áreas, que

apresentaram linhas muito fechadas, o que indica alta variabilidade espacial entre pontos vizinhos.

O P rem na camada 0,10-0,20 m apresentou variação de 19,88 e 43,38 mg kg⁻¹, concentrando os maiores valores na porção central do mapa, que representa o subsistema policultivo. Notam-se manchas de teores mais baixos em todos os subsistemas do módulo experimental. De maneira geral, o teor de P rem foi maior nas camadas superficiais do solo, principalmente em 0,05-0,10 m (Figura 18F) e 0,10-0,20 m (Figura 19F) que pode estar relacionado com os maiores teores de COT e menores quantidades de argila nas camadas superficiais do solo, influenciando na capacidade de adsorção de P. No que se refere ao P rem na camada de 0,20-0,40 m, os valores situaram-se entre 11,30 e 34,08 mg kg⁻¹, com os teores mais altos nas porções inferior e ao centro do mapa, e, os menores teores se concentraram no norte do mapa. Nesta profundidade, a distribuição dos teores de P rem no espaço foi fortemente influenciada pelo teor de argila (Figura 20G), uma vez que os maiores valores de P remanescente foram obtidos nas áreas com menor percentual dessa fração textural, enquanto que as regiões com maiores teores de argila apresentaram menor P rem, ou seja, maior capacidade de adsorver P.

Para as frações granulométricas do solo, os valores para argila, areia e silte variaram entre 5 e 24%, 61 e 92% e 0,01 e 24% para argila, areia e silte, respectivamente (camada 0,10-0,20 m). Na camada de 0,20-0,40 m, a variação observada foi de 3 a 37%, 55 a 92% e 1 a 38% para argila, areia e silte, respectivamente. O padrão de variabilidade espacial para as frações granulométricas foi semelhante ao verificado nas profundidades superficiais, exceto pelo fato de que na camada 0,20-0,40 m, uma região onde ocorria maior teores de argila (ao sul do mapa, à extrema esquerda), passou a apresentar maior percentual de silte (Figura 20I).

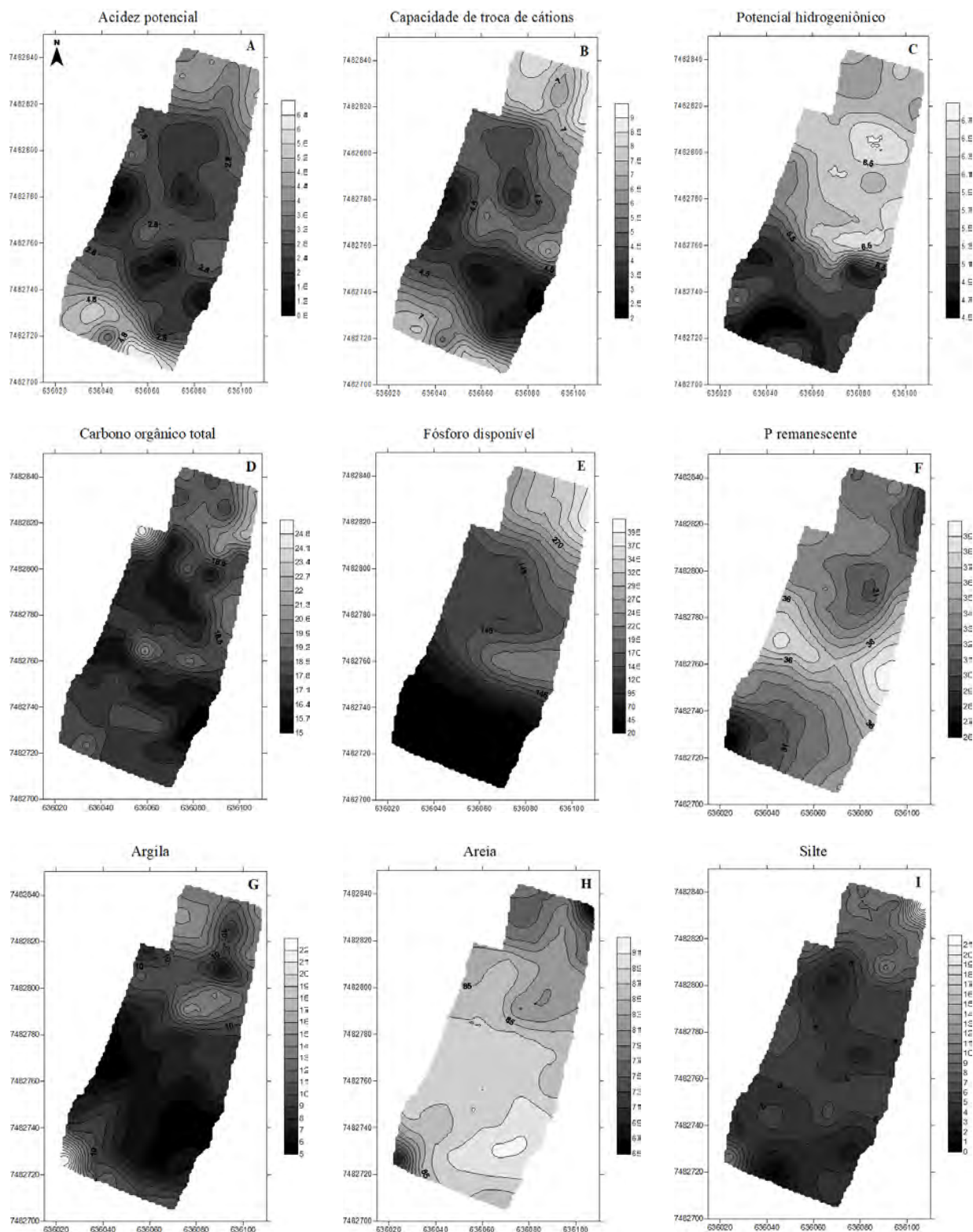


Figura 19. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,10-0,20 m. Seropédica, RJ, 2019.

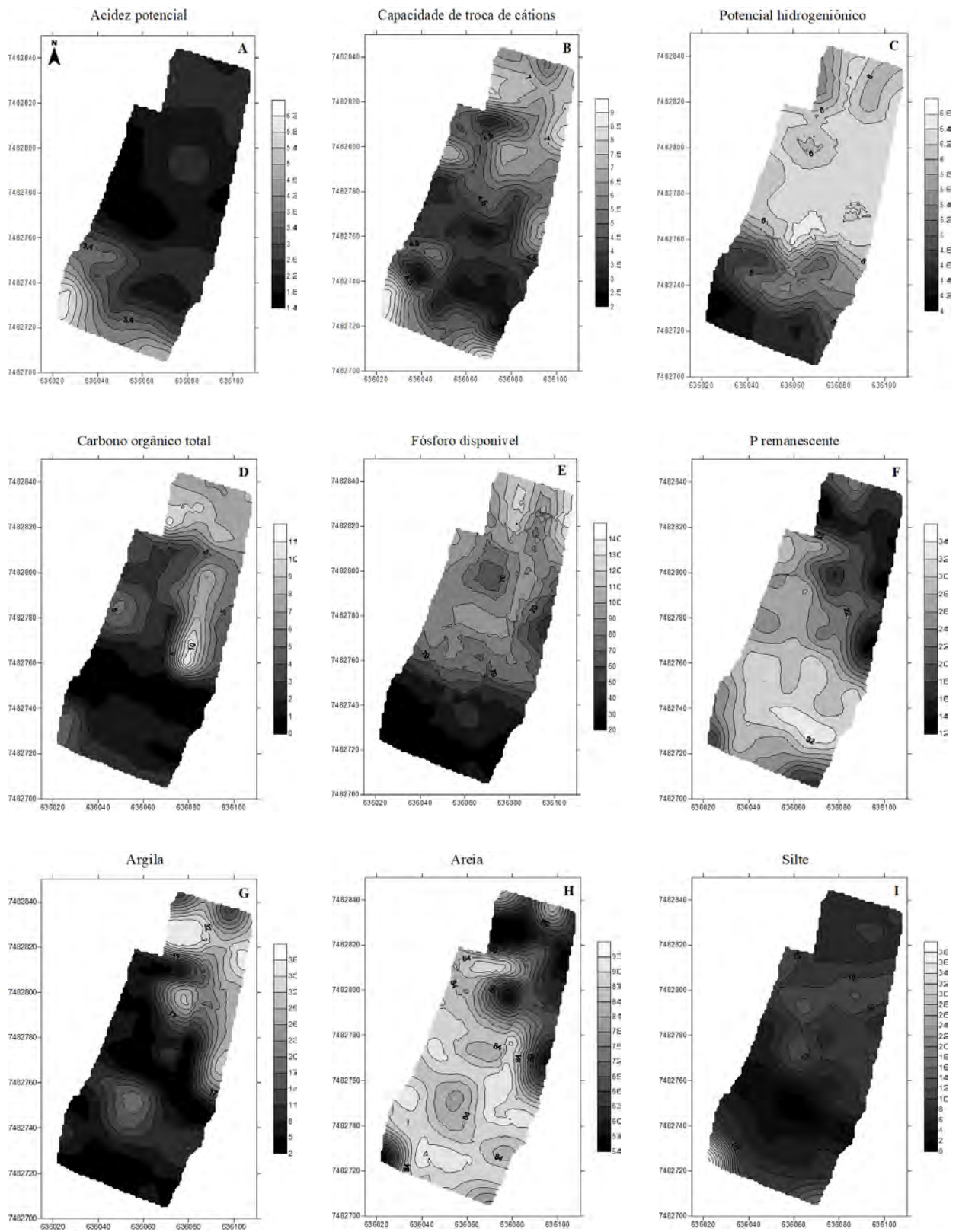


Figura 20. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,20-0,40 m. Seropédica, RJ, 2019.

Na Figura 21 são apresentados os mapas de variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo do módulo experimental, na profundidade 0,40-0,60 m. Na camada mais profunda do solo em estudo, houve variação de 0,19 e 7,69 $\text{Cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, 0,93 e 10,11 $\text{Cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, 4,10 e 6,90; 0,12 e 10,90 g kg^{-1} , 20,02 e 137,20 mg dm^{-3} e 6,35 e 24,84, para H+Al, CTC, pH, COT, P e P rem, respectivamente. De acordo com as classes de fertilidade do solo (ALVAREZ et al., 1999; ALVAREZ et al., 2000), os valores para os atributos variaram entre muito baixo e baixo, muito baixo e bom, muito baixo (acidez muito elevada) e alto (acidez fraca), muito baixo e baixo, bom e muito bom e capacidade de adsorção de P muito alta e média, para H+Al, CTC, pH, COT, P e P rem, respectivamente. De maneira geral, na camada mais profunda, houve um decréscimo na qualidade dos atributos químicas do solo avaliados em relação às camadas superficiais e subsuperficiais. Em relação a granulometria, na camada mais profunda, ocorreu o mesmo padrão de variabilidade vertical, uma vez que o teor de argila aumentou em função da profundidade do solo. Apesar do aumento da argila, o maior percentual foi observado para fração areia.

O mapa de H+Al (Figura 21A) mostra a ocorrência de maiores valores na região central do mapa, apresentando manchas com linhas fechadas, indicando variabilidade alta, mesmo entre pontos amostrais próximos entre si. Ao sul do mapa, também ocorreu valores elevados de H+Al, e, os menores valores se concentraram na área de policultivo, próximo à área de transição desta com o subsistema G/C. Para CTC (Figura 21B), os maiores valores ocorreram nas regiões norte e centro do mapa, apresentando características de variabilidade espacial muito semelhantes a verificada para H+Al. Já o pH (Figura 21C), apresentou manchas de menores valores (acidez mais elevada) na porção sul do mapa, com manchas de valores mais altos no centro da área de policultivo.

O mapa de COT (Figura 21D) apresenta linhas muito abertas, o que indica baixa variabilidade dos teores em toda a extensão do mapa, inclusive, entre vizinhos mais distantes. Na maior porção do mapa, ocorreu baixos teores de COT, com exceção da área de transição entre os subsistemas tomate/telado e policultivo, que apresentam mancha de teores altos, porém, alcançando teores menores ou iguais a 10 g kg^{-1} , considerado baixo, seguindo a classificação proposta por Alvarez et al. (1999).

O P disponível (Figura 21E) apresentou alta variabilidade, uma vez que na maior parte do mapa, as linhas estão bem fechadas, com exceção da porção inferior do mapa (subsistema G/C), que apresenta linhas mais espaçadas, ou seja, com menor variabilidade espacial entre pontos vizinhos. Esta área apresentou a maior concentração de teores baixos de P em relação às demais regiões do mapa.

Apesar de ter ocorrido decréscimo dos teores de P em função da profundidade do solo, a camada mais profunda (0,40-0,60 m) também apresentou classes de P variando de bom a muito bom, o que pode estar associado ao histórico de manejo do módulo experimental. Segundo Donagemma et al. (2016), solos com altos teores de areia (como verificado no módulo) possuem características como fragilidade, difícil formação de agregados, baixa retenção de água, nutrientes e matéria orgânica. Portanto, os teores elevados de P médios observados na área de estudo são respostas positivas das práticas implantadas no manejo do agroecossistema (PIAN, 2019). Estes teores podem ser explicados pela constante adição de fertilizantes orgânicos, como composto fermentado, composto vegetal, cobertura morta e biomassa vegetal, especialmente de adubos verdes (PERIN et al., 2004; PARK et al., 2011; BOECHAT et al., 2013; PIAN, 2019), bem como da adição de fertilizantes fosfatados, como termofosfato e fosfato natural. A influência do histórico de manejo fica clara ao comparar os valores encontrados no presente estudo com os achados de Mata (2012); Mata (2016) e Pian (2019) que mostra, de maneira geral, um acréscimo nos teores de P disponível ao longo do tempo, principalmente nas camadas superficiais do solo.

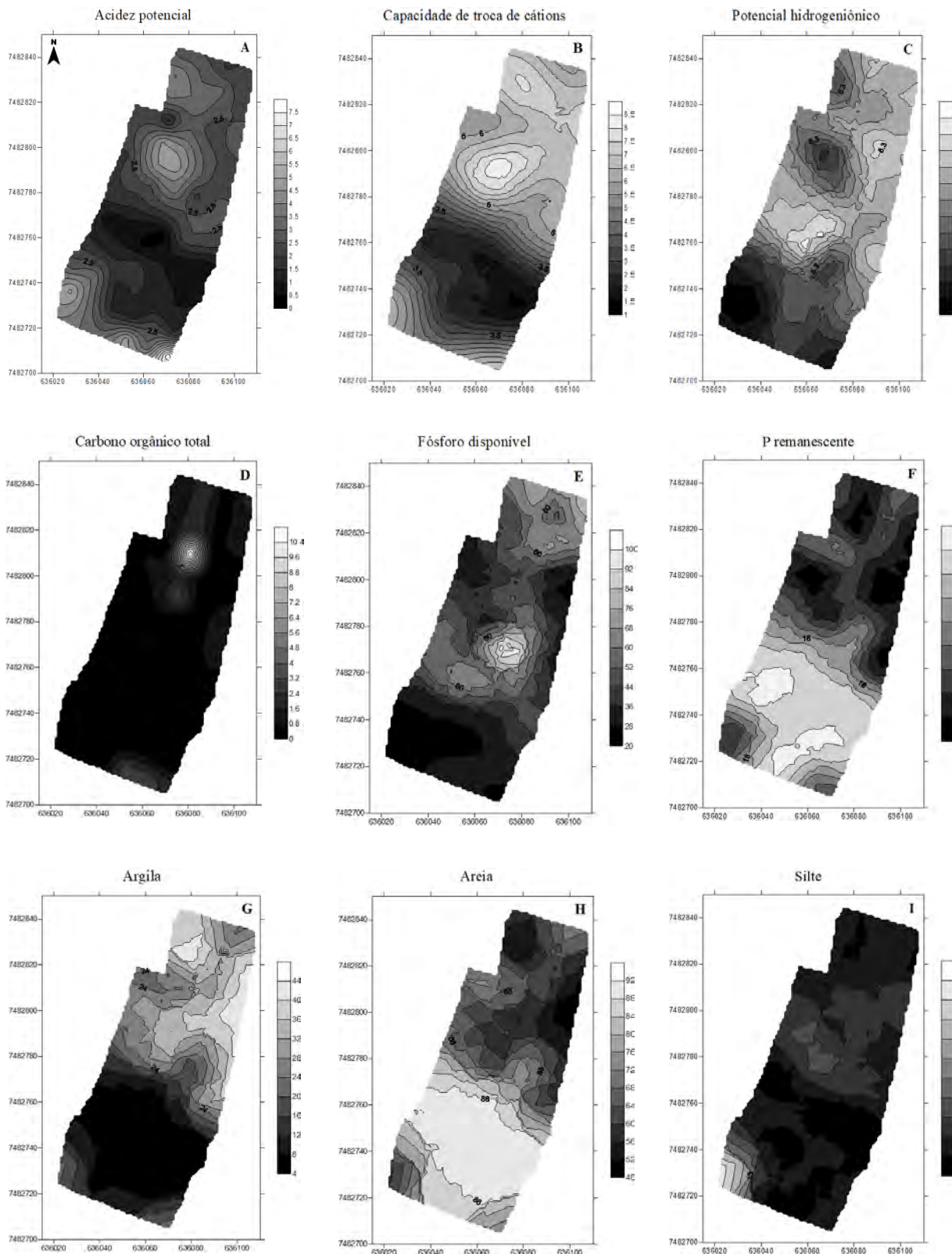


Figura 21. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,40-0,60 m. Seropédica, RJ, 2019.

Para P rem (Figura 21F), o mapa de variabilidade espacial mostra que a variável foi diretamente influenciada pela textura do solo, já que foi maior nas áreas com menor teor de argila (Figura 21G) e, conseqüentemente, onde ocorreu o maior percentual de areia (Figura 21H). Inclusive, considerando as linhas dos mapas, nota-se o mesmo padrão de variabilidade espacial para as três variáveis, ou seja, linhas mais espaçadas (menor variabilidade) na porção inferior, e linhas mais fechadas (maior variabilidade) na porção superior do mapa.

Os mapas da variabilidade espacial das formas inorgânicas e orgânicas de P, fração residual, Po total e P total do solo no módulo, na profundidade 0,0-0,05 m são apresentados na Figura 22. Os teores variaram entre 3,60 e 108,20 mg kg⁻¹; 9,74 e 686,0 mg kg⁻¹; 8,60 e 57,56 mg kg⁻¹; 2,38 e 33,62 mg kg⁻¹; 28,81 e 920,70 mg kg⁻¹; 0,91 e 12,88 mg kg⁻¹ e 1,16 e 38,90 mg kg⁻¹ para Pi bic, Pi H, Pi OH, Po bic, Po H, Po OH e P residual, respectivamente. O Po total apresentou variação entre 38,68 e 955,10 mg kg⁻¹. Já o P total do solo variou entre 65,61 e 1282,0 mg kg⁻¹.

A fração moderadamente lábil de Pi e Po foram as mais predominantes no solo em estudo, e, os menores valores foram verificados na fração moderadamente resistente da forma orgânica de P. Vale destacar, que o maior teor de P lábil foi encontrado na forma inorgânica (108,20 mg kg⁻¹), apresentando, em média, 9% de P lábil em relação ao P total. Observou-se, ainda, que o conteúdo de P na forma orgânica representou de 15 a 86% do P total, tendo em 24 pontos do grid amostral, representando mais de 50% do P total do solo, atingindo uma média de 43,41%, percentual semelhante ao observado por Partelli et al., 2009 em sistemas orgânicos de produção. De acordo com os autores, o valor médio de 43% de Po é expressivo, podendo ser um indicativo da mudança de comportamento no ciclo do P em função do manejo orgânico adotado nos solos, como o menor revolvimento do solo, cultivo de plantas de cobertura, a permanência de resíduos vegetais e a adição de materiais orgânicos, que podem favorecer a manutenção e o acúmulo do P orgânico e lábil. Segundo Zhou et al. (1997) a forma orgânica de P pode ser decisiva na manutenção do P disponível, visto a maior facilidade de dessorção do P quando associado a complexos organo-metálicos, que quando associado a partículas inorgânicas.

A fração lábil de Po teve pequena participação no Po total. Em contrapartida, a fração moderadamente lábil do Po representou de 63 a 98% do Po total do solo do módulo experimental, com 36 pontos amostrais alcançando mais de 90%. Esta fração de Po é importante pelo fato de estar associada aos ácidos fúlvicos (SEQUI et al., 1986), mais facilmente acessados pelas plantas e microrganismos que os ácidos húmicos, conseqüentemente, disponibilizando P com relativa facilidade (ROCHA et al., 2005).

Em relação aos mapas de isolinhas (Figura 22), verificou-se um padrão semelhante de variabilidade espacial para as frações de P inorgânico (Pi bic, Pi H e Pi OH) (Figura 22, partes A, B e C). Os maiores teores ocorreram na porção norte do mapa (área tomate/telado), com uma diminuição para o sentido sul. Nota-se uma maior variabilidade para Pi OH, inclusive entre pontos próximos entre si, uma vez que o mapa apresenta isolinhas mais fechadas.

Para a forma orgânica de P, as frações lábil (Figura 22D) e moderadamente lábil (Figura 22E) apresentaram manchas de valores elevados na área central do mapa, ou seja, no policultivo. Po lábil apresentou manchas de teores baixos nas porções central e sul do mapa. Porém, não ocorreram de forma concentrada nestas áreas. Já para P moderadamente lábil, os menores teores foram observados na porção sul, ocupando toda a extensão referente ao subsistema G/C, demonstrando pouca variabilidade nesta região do mapa.

Para Po OH (Figura 22F), os maiores teores ocorreram nas porções norte, centro e na extremidade do sul do mapa, com teores menores sendo verificados no sul do módulo experimental (G/C). O P residual (Figura 22G) apresentou maiores valores ao norte do mapa, e, também foi verificado valores mais altos na extremidade esquerda na parte inferior do mapa. De maneira geral, as frações mais estáveis de P ocorreram nas regiões com maior

percentual de argila (Figura 17G), principalmente O P residual. Segundo Silva et al. (2010), a disponibilidade de P é maior em locais onde os valores de argila são menores e onde, conseqüentemente, os valores de areia são maiores. Solos com maior teor de argila, exercem predominantemente função reducionista da disponibilidade de P devido a processos de adsorção e fixação, enquanto aqueles com menor concentração de argila, promovem aumento da disponibilidade deste elemento (NOVAIS; SMYTH, 1999). Contudo, como na camada superficial (0,0-0,05 m) do solo estudado foi verificado baixo teor de argila (Figura 17G), as formas mais resistentes de P atingiram baixos valores, representando, em média, 6% (Pi OH), 1% (Po OH) e 2% P (residual) do P total no solo do módulo experimental.

No mapa de Po total (Figura 22H) nota-se grande semelhança na distribuição espacial desta variável com o Po H, uma vez que a fração moderadamente lábil do Po representou de 63 a 98% do Po total do solo do módulo experimental, com 36 pontos amostrais alcançando mais de 90%. Ou seja, grande parte do Po total é constituída de Po H, originando mapas semelhantes para as duas variáveis. Já o P total (Figura 22I) apresentou mapa de distribuição espacial semelhantes aos mapas de Pi moderadamente lábil e Po moderadamente lábil, atribuído aos teores mais expressivos para as essas duas frações no solo estudado.

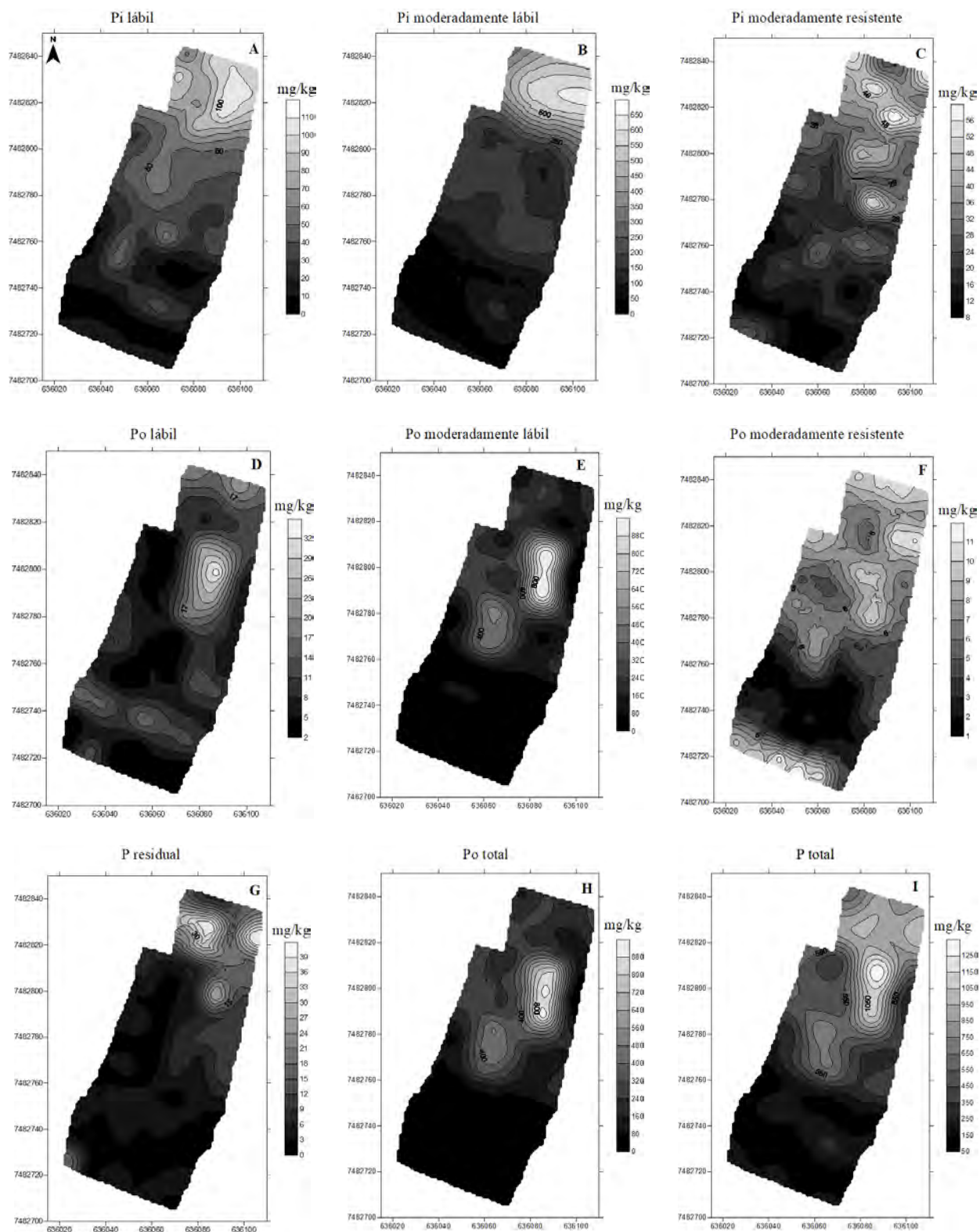


Figura 22. Mapas da variabilidade espacial das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,0-0,05 m. Seropédica, RJ, 2019.

Na profundidade 0,05-0,10 m (Figura 23), os teores de P variaram entre 6,81 e 181,8 mg kg⁻¹; 22,95 e 593,5 mg kg⁻¹; 5,33 e 42,17 mg kg⁻¹, 8,6 e 216 mg kg⁻¹; 17,96 e 408,3 mg kg⁻¹; 1,44 e 27,48 mg kg⁻¹ e 1,34 e 59,66 mg kg⁻¹ para Pi bic, Pi H, Pi OH, P bic, Po H, Po OH e P residual, respectivamente. O Po total apresentou variação entre 41,11 e 530,10 mg kg⁻¹. Já o P total do solo variou entre 100 e 1256 mg kg⁻¹.

Já para profundidade 0,10-0,20 m (Figura 24), observa-se variação entre 3,10 e 179,40 mg kg⁻¹; 32,25 e 611,90 mg kg⁻¹; 0,95 e 41,47 mg kg⁻¹, 4,11 e 58,38 mg kg⁻¹; 6,95 e 424,10 mg kg⁻¹; 2,44 e 31,86 mg kg⁻¹ e 1,29 e 33,73 mg kg⁻¹ para Pi bic, Pi H, Pi OH, P bic, Po H, Po OH e P residual, respectivamente. Já para Po total, houve variação de 23,55 a 476,50 mg kg⁻¹, e o P total do solo variou entre 66,50 e 1314 mg kg⁻¹.

Assim como ocorreu na camada superficial do solo, nas duas profundidades inferiores (0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m), a fração moderadamente lábil de Pi e Po foi a mais predominante no solo, constituindo 40% e 22% do P total para Pi e Po, respectivamente, na profundidade 0,05-0,10 m. Já na camada de 0,10-0,20 m, Pi e Po moderadamente lábil representou 47% e 22% em relação ao P total, respectivamente. Os menores teores foram verificados na fração moderadamente resistente da forma orgânica de P, nas duas profundidades, indicando baixa capacidade de adsorção no solo do módulo avaliado, confirmado pelos altos teores de P disponível e valores de P remanescente, principalmente nas camadas superficiais.

Na camada 0,05-0,10, o maior teor de P lábil foi encontrado na forma orgânica de P, com 216,14 mg kg⁻¹, com uma média entre os teores de 15% de P lábil em relação ao P total, Já P inorgânico lábil representou 13% do P total. Já na profundidade 0,10-0,20 m, o Pi atingiu o maior teor de P lábil, com 179,40 mg kg⁻¹, apresentando média entre os teores de 16% em relação ao P total. Por outro lado, o Po lábil alcançou uma média de apenas 5% do P total.

Na camada 0,05-0,10 m, o conteúdo de P na forma orgânica representou de 19 a 71% do P total, com 12 pontos do grid amostral representado mais de 50% do P total do solo, atingindo uma média de 40%. Gatiboni et al. (2005) relatam que, em solos adubados, a contribuição do P orgânico para a nutrição das plantas foi de 6%, e aumentou para 43% no solo sem adição de fertilizantes minerais. Já na profundidade 0,10-0,20 m, a soma das frações de Po constituiu 12% a 64%, com uma média entre os valores percentuais de 29%. Apenas três pontos amostrais do grid apresentaram mais de 50% de Po em relação ao P total do solo. Portanto, nota-se uma tendência de diminuição na participação do Po no P total em função da profundidade, principalmente ao comparar as duas profundidades superficiais (apresentando percentuais próximos) e a camada de 0,10-0,20 m, que por sua vez, apresenta um significativo decréscimo no Po em relação ao P total do solo.

Nas Figuras 23 e 24, partes A, B e C cada, são apresentados os mapas de variabilidade espacial das frações de Pi bic, Pi H e Pi OH, nas profundidades 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m, respectivamente. Nas duas profundidades, de maneira geral, ocorrem maiores teores de Pi na porção norte do mapa, já os mais baixos foram verificados na parte sul. Nota-se que o Pi H mostrou pouca variabilidade no subsistema G/C, com os menores valores concentrados nessa região, nas duas profundidades. Por outro lado, o Pi bic apresenta maior variabilidade espacial no subsistema G/C, na camada 0,05-0,10 m. Já na camada 0,10-0,20 m, Pi bic apresenta os valores mais baixos concentrados nesta mesma área, indicando influência da profundidade do solo na fração lábil de Pi, principalmente na área destinada a produção de biomassa vegetal.

Em relação às frações de Po, na camada 0,05-0,10 m (Figura 23) verifica-se maior variabilidade espacial, em que as frações Po bic (Figura 23D) e Po H (Figura 23E) apresentam maiores teores nas porções norte e central do mapa, áreas destinadas ao cultivo das hortaliças. Segundo Schoninger et al. (2012), o Po bic é uma forma de P associada à biomassa microbiana do solo e seu esgotamento ocorre principalmente quando o conteúdo de P

disponível e P_i bic não são suficientes para suprir a demanda das culturas. Ainda, de acordo com os autores, quando a disponibilidade de P inorgânico não é limitante e a presença de carbono orgânico estimula o crescimento e a atividade microbiana na rizosfera, não apenas a manutenção do conteúdo de P_o bic é possível, mas também a elevação dos conteúdos desta forma de P; podendo ser uma fonte importante de P a medida que os teores de P inorgânico diminuem ao decorrer dos cultivos.

Já na fração P_o OH, os valores mais elevados ocorreram na extremidade sul e ao norte do mapa de isolinhas (Figura 23F). Já para profundidade 0,10-0,20 m (Figura 24), observou-se a ocorrência de maiores valores para as três frações de P_o na porção norte do mapa, região que representa o subsistema de tomate/telado.

Cabe ressaltar, que de maneira geral, nas camadas mais superficiais do solo, os maiores teores de P inorgânico e orgânico nas diferentes frações foram encontrados na área de tomate/telado (porção superior dos mapas), área que recebe constante fertilização, adição de MO e cultivo de adubos verdes. Aliado a isso, a área de telado contém Sombrite, que confere uma menor incidência solar. Além disso, a área de tomate é manejada sem preparo de canteiros, com revolvimento mínimo do solo, o que pode conferir uma decomposição mais lenta e gradual do material orgânico, tendo como consequência a melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo, que irão repercutir em sua fertilidade (PAUL et al., 2013). No presente estudo, ao analisar os mapas de COT nas três camadas superficiais, nota-se que houve maior acúmulo na porção referente ao subsistema de tomate/telado, ainda, ao analisar as médias das características químicas de forma separada para cada subsistema (Tabela 2), verifica-se melhores condições para a maioria dos atributos químicos no subsistema supramencionado, o que confirma que o manejo dessa área é eficiente. O manejo do solo, principalmente relacionado à adição de matéria orgânica, é muito importante para a disponibilidade de P. O teor de matéria orgânica é um relevante controlador da síntese de P_o no solo e o seu aumento eleva também a proporção de P_o em relação às quantidades totais de P (HARRISON, 1987). Desta forma, quando o sistema de manejo aumenta a matéria orgânica do solo, este também contribui para o aumento de formas mais lábeis de P, com diminuição da adsorção e, conseqüente aumento da disponibilidade (ANDRADE et al., 2003; MATOS et al., 2006).

Em relação ao mapa de P residual, nas duas profundidades (Figuras 23G e 24G), ocorreram maiores teores na porção norte do mapa, com pequena mancha de teores mais altos na extremidade esquerda, ao sul, principalmente na profundidade 0,10-0,20 m. Já para o mapa de P_o total, nota-se que este foi semelhante ao de P_o H, nas duas profundidades (0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m). Verificou-se, também, semelhança entre os mapas de P total (Figuras 23I e 24I) e P_i H que são explicadas pela elevada contribuição de P_o H e P_i H em relação ao P_o total e P total, respectivamente.

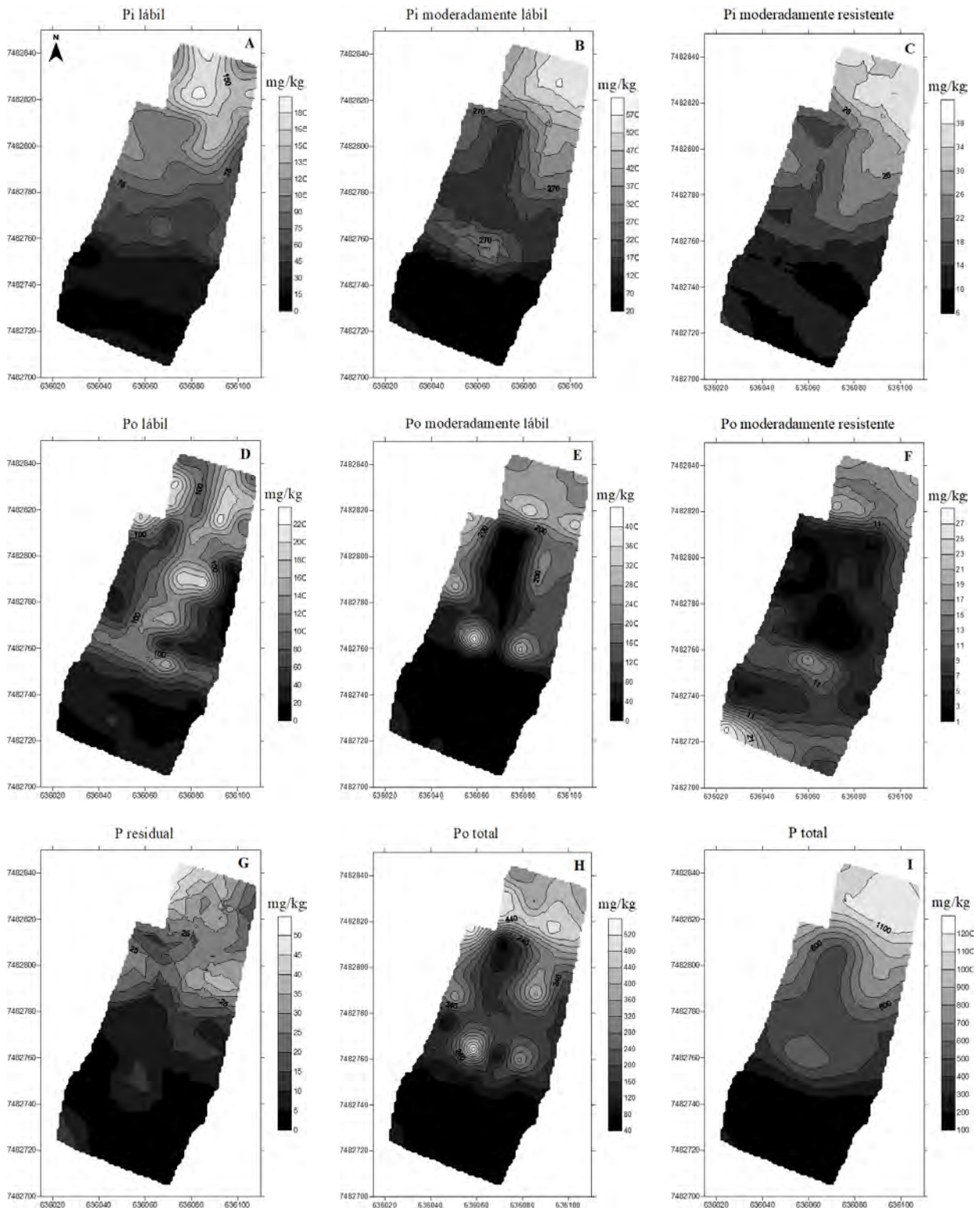


Figura 23. Mapas da variabilidade espacial das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,05-0,10 m. Seropédica, RJ, 2019.

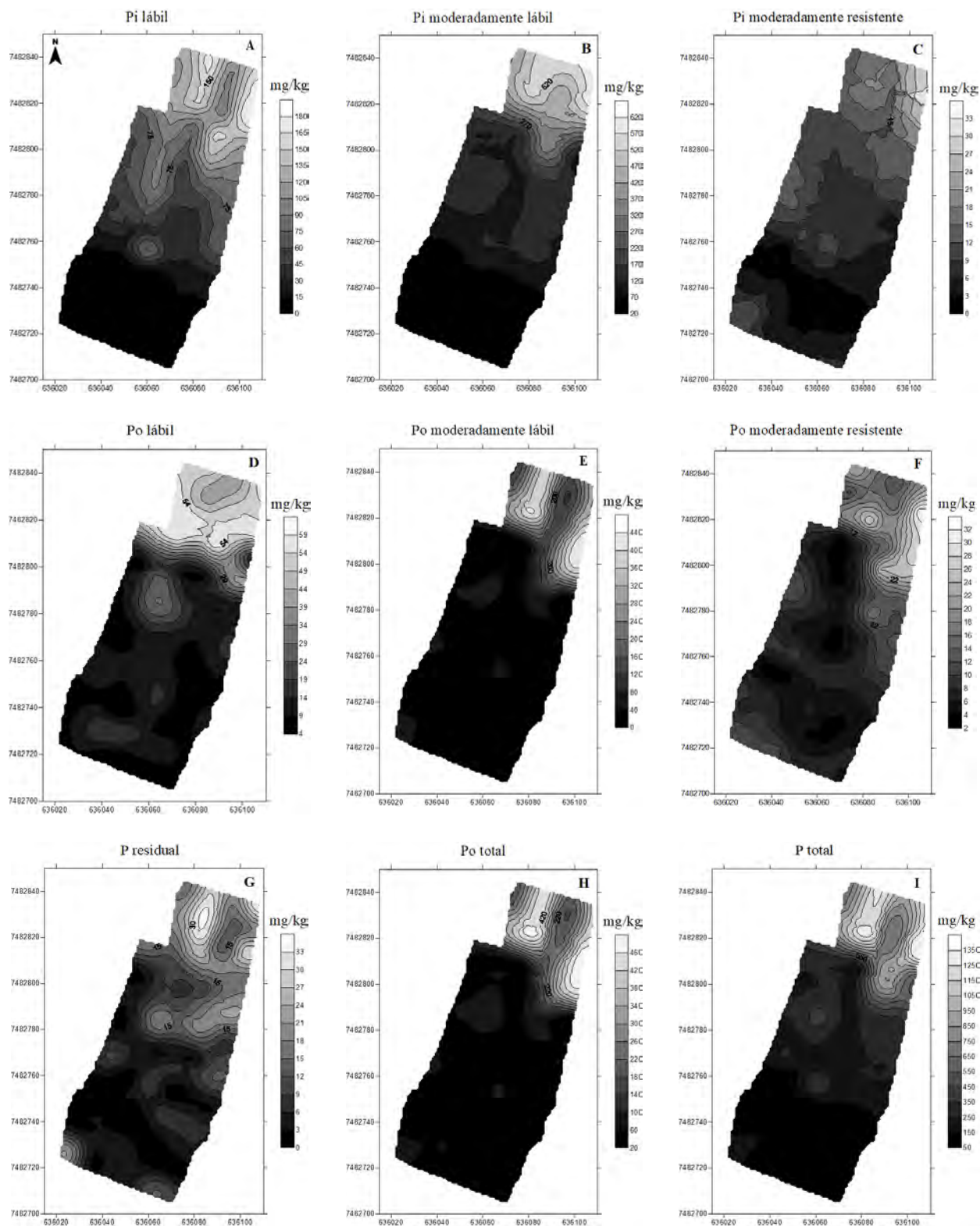


Figura 24. Mapas da variabilidade espacial das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,10-0,20 m. Seropédica, RJ, 2019.

Na profundidade 0,20-0,40 m (Figura 25), os teores de P variaram entre 5,10 e 97,49 mg kg⁻¹; 14,04 e 272,0 mg kg⁻¹; 0,24 e 34,10 mg kg⁻¹, 27,07 e 448,80 mg kg⁻¹; 16,41 e 518,80 mg kg⁻¹; 1,68 e 33,86 mg kg⁻¹ e 4,95 e 70,79 mg kg⁻¹ para Pi bic, Pi H, Pi OH, P bic, Po H, Po OH e P residual, respectivamente. O P orgânico total (Po total) apresentou variação entre 56,97 e 914,50 mg kg⁻¹. Já o P total do solo variou entre 87,38 e 1402 mg kg⁻¹.

Já para profundidade 0,40-0,60 m (Figura 26), observa-se variação entre 6,03 e 41,53 mg kg⁻¹; 5,24 e 167,50 mg kg⁻¹; 0,46 e 15 mg kg⁻¹, 3,04 e 35,97 mg kg⁻¹; 13,63 e 88,79 mg kg⁻¹; 2,63 e 49,58 mg kg⁻¹ e 10,48 e 86,79 mg kg⁻¹ para Pi bic, Pi H, Pi OH, P bic, Po H, Po OH e P residual, respectivamente. Já para Po total, houve variação de 23,19 a 141,80 mg kg⁻¹, e o P total do solo variou entre 54,12 e 384,50 mg kg⁻¹.

Na camada 0,20-0,40 m, as frações lábil de Po e moderadamente lábil de Pi foram predominantes no solo, constituindo 34% e 24% do P total para Po bic e Pi H, respectivamente. Já na camada de 0,40-0,60 m, os mais expressivos foram Pi e Po moderadamente lábil, representando 32% e 20% em relação ao P total, respectivamente. Os menores teores foram verificados na fração moderadamente resistente da forma inorgânica de P, nas duas profundidades.

Na camada 0,20-0,40 m, o maior teor de P lábil foi encontrado na forma orgânica de P, com 518,80 mg kg⁻¹, com uma média entre os teores de 34% de Po lábil em relação ao P total. Já P inorgânico lábil representou 9% do P total. Na profundidade 0,40-0,60 m, o Pi atingiu o maior teor de P lábil, com 167,50 mg kg⁻¹, apresentando média entre os teores de 9% em relação ao P total. Por outro lado, o Po lábil alcançou uma média de apenas 6%.

Na camada 0,20-0,40 m, o conteúdo de P na forma orgânica representou de 21 a 77% do P total, com 45 pontos do grid amostral representando mais de 50% do P total do solo, atingindo uma média de 53%. Já na profundidade 0,40-0,60 m, a soma das frações de P orgânico constituiu 24% a 60%, com uma média entre os valores percentuais de 37%. Apenas dez pontos amostrais do grid apresentaram mais de 50% de Po em relação ao P total do solo.

Os mapas de variabilidade espacial das frações inorgânicas e orgânicas de P, P residual, Po total e P total estão representados nas Figuras 25 e 26, para as profundidades 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente. Na profundidade 0,20-0,40 m, as frações inorgânicas (Figura 25, partes A, B e C) de P apresentam um padrão de distribuição espacial semelhante, com os teores mais altos ocorrendo na face norte e central do mapa, e a porção sul apresentando concentração de teores mais baixos, principalmente para Pi bic e Pi H. Já as frações de P orgânico (Figura 25, partes D, E e F) nota-se que Po bic e P OH apresentaram teores mais elevados na porção norte e central do mapa, principalmente na área de transição entre os subsistemas tomate/telado e policultivo. Já para Po H, os maiores teores se concentraram no norte do mapa. O P residual, nas duas profundidades (Figuras 25G e 26G) apresentou maiores valores na porção norte do mapa, com pequena mancha de valores altos na extremidade esquerda, ao sul.

Os mapas de Po total (Figura 25H) e P total (Figura 25I) apresentaram variabilidade espacial semelhante as frações mais lábeis de Po, devido à alta contribuição de Po bic e Po H para estes compartimentos.

Na camada mais profunda do solo (0,20-0,40 m), verificou-se que as frações Pi bic (Figura 26A) e Po bic (Figura 26D) apresentaram maiores teores na porção central do mapa, correspondente a área de policultivo. As frações Pi H, Pi OH, Po H, Pi OH e P residual (Figura 26, partes B, C, E, F e G, respectivamente) apresentaram variabilidade espacial semelhantes, com maiores teores nas áreas com ocorrência de maiores percentuais de argila, indicando alta influência da textura em função da maior profundidade do solo. O Po total (Figura 26H) apresentou o mesmo padrão de variabilidade espacial do Po H. Já P total (Figura 26I) apresenta mapa semelhante ao Pi H, relacionado a expressividade destas frações nesses compartimentos.

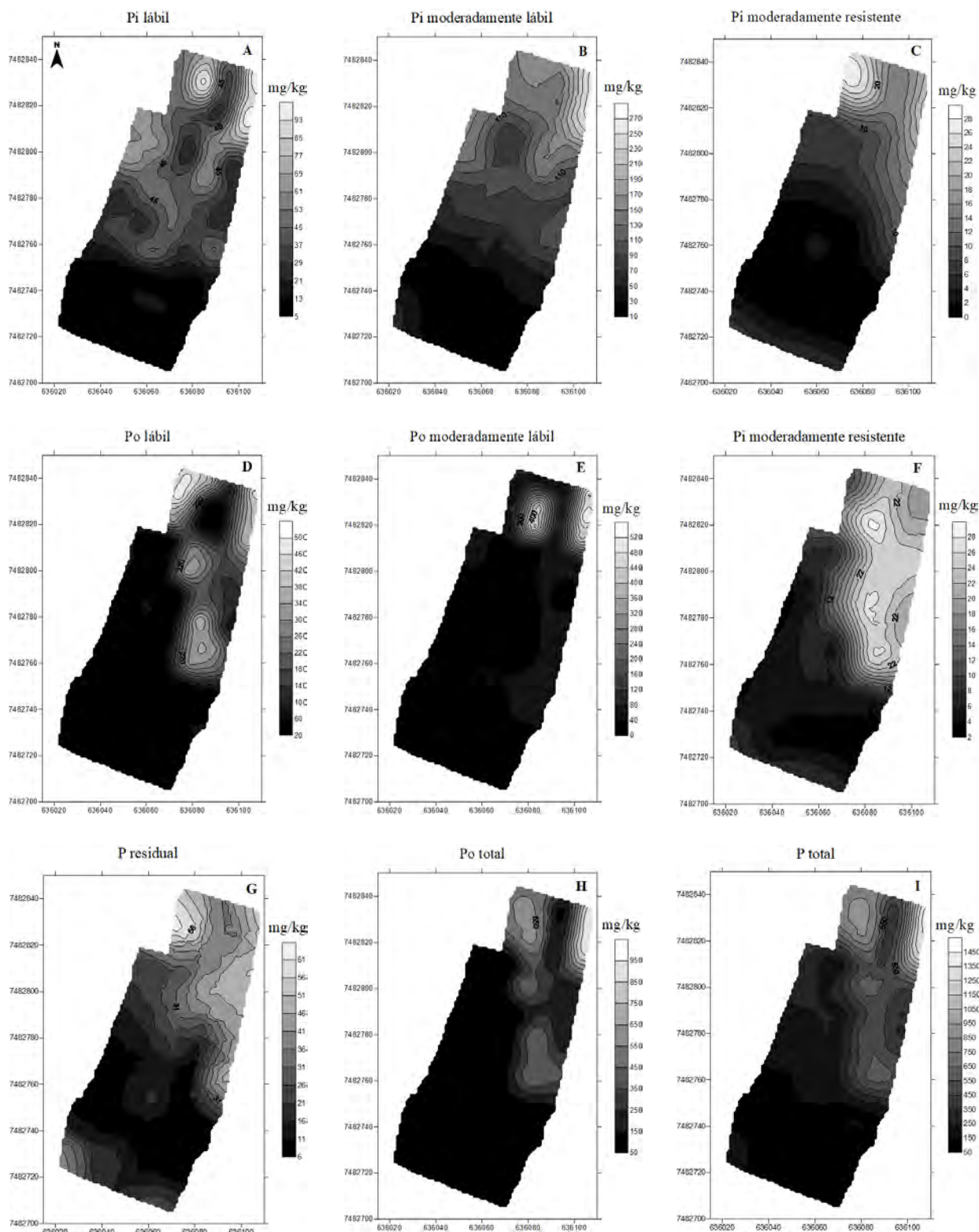


Figura 25. Mapas da variabilidade espacial das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,20-0,40 m. Seropédica, RJ, 2019.

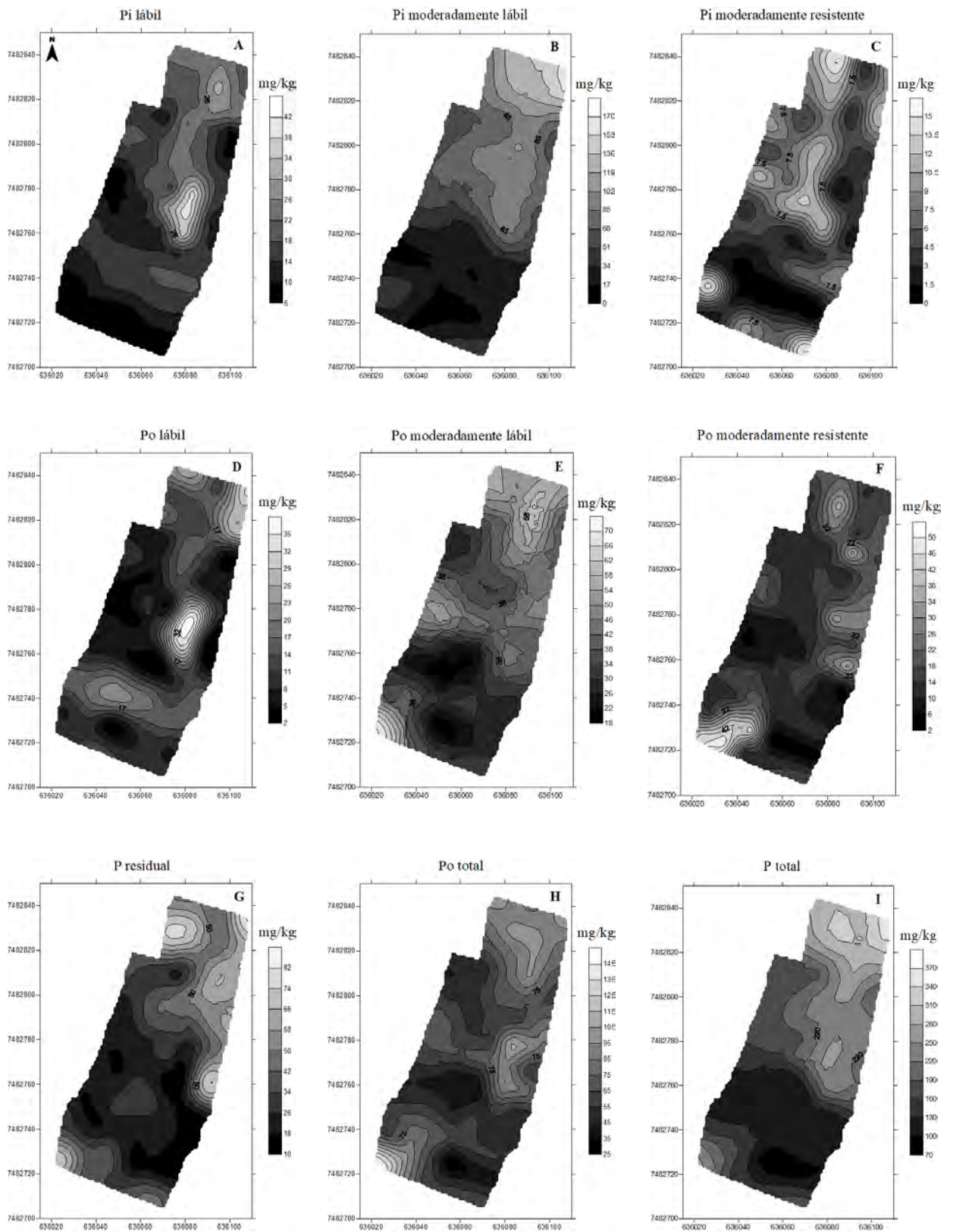


Figura 26. Mapas da variabilidade espacial das formas inorgânicas e orgânicas de fósforo, fração residual, P orgânico total e P total do solo no Módulo de cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças, na profundidade 0,40-0,60 m. Seropédica, RJ, 2019.

De maneira geral, observou-se um padrão de variabilidade espacial para as frações de P, em todas as profundidades do solo. As porções norte e central do módulo experimental apresentam os maiores teores para todas as frações, principalmente as menos estáveis, ou seja, lábeis e moderadamente lábeis, tanto na forma orgânica quanto na inorgânica. Este resultado está relacionado com o manejo adotado na área, conferindo boas condições de fertilidade do solo, inclusive para P, que possui uma complexa dinâmica, principalmente em solos de regiões tropicais.

Vale destacar que as regiões com maiores concentrações de P nas formas menos recalcitrantes (lábeis e moderadamente lábeis), e, inclusive, P disponível no módulo experimental de hortaliças ocorrem onde o manejo é mais intenso, com constante fertilização, adição de MO, cobertura vegetal na superfície do solo, plantio de adubos verdes, rotação de culturas, entre outros. Por outro lado, a área que apresentou teores mais baixos de P para todas as frações inorgânicas e orgânicas é destinada a produção de biomassa vegetal, que é transferida para as demais áreas do módulo. Portanto, apresenta as condições químicas mais distantes das ideais, que pode ser visualizado nos mapas para todas as profundidades de amostragem e na Tabela 2.

A matéria orgânica apresenta grande influência na distribuição espacial das frações de P no módulo. A adoção de práticas de manejo conservacionistas normalmente tem efeito positivo sobre o teor e a qualidade da matéria orgânica do solo (BAYER; MIELNICZUK, 1997), conseqüentemente, pode modificar a dinâmica do P, alterando o conteúdo de suas diferentes formas. Normalmente o incremento de P orgânico ocorre em sistemas onde os teores de C orgânico total e P total aumentam (NZIGUHEBA; BÜNEMANN, 2005). O acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo e formação de estoque de P microbiano, responsável pela mineralização e liberação gradual e parcial de P_o (RHEINHEIMER, 2000; LOPES et al., 2004; MARTINAZZO et al., 200; LEITE, 2015), evita a adsorção rápida do P_i aos colóides minerais (MARTINAZZO et al., 2007). Produtos resultantes da decomposição da matéria orgânica, como ácidos orgânicos e húmus, possuem a capacidade de formar complexos com os óxidos de ferro e alumínio, evitando a sua disponibilidade para a fixação de P. Andrade et al. (2001), ao verificaram o efeito da aplicação de resíduos orgânicos na adsorção de P, concluíram que a adição de matéria orgânica reduziu a fixação de P nos solos avaliados.

Segundo Carvalho et al. (2014), o manejo com cobertura do solo é capaz de manter maiores frações de P disponíveis para as culturas agrícolas, reduzindo assim as perdas de P para reservatórios indisponíveis. De acordo com os autores, plantas de cobertura, especialmente em condições adequadas para a produção de biomassa vegetal e sincronização entre sua decomposição e o uso de P pela cultura a seguir, pode promover a maior disponibilidade desse elemento. De acordo com Tiecher et al. (2012), a adição de grande quantidade de resíduos vegetais adicionada à superfície do solo aumenta o nível de P orgânico no solo, o teor de P armazenado na biomassa microbiana e a atividade da enzima fosfatase.

Observa-se que de maneira geral, no módulo experimental, o aumento da profundidade do solo acarreta maior influência da textura do solo sobre as frações de P, uma vez que ocorreram diminuições consideráveis das frações mais lábeis com o aumento no percentual de argila, verificado, de forma mais clara, na camada mais profunda do solo. Além da diminuição dos teores de P mais lábeis, houve um aumento nas frações mais recalcitrantes em relação as camadas superficiais do solo, principalmente P residual. Segundo Novais e Smyth (1999), em solos mais argilosos ocorre uma maior quantidade de sítios ácidos de Lewis, favorecendo assim a adsorção de P. A magnitude da adsorção de P depende da natureza e da quantidade de sítios disponíveis na superfície dos minerais secundários, sendo, dentro de uma mesma mineralogia, afetada positivamente pelo maior conteúdo de argila (MOREIRA et al., 2006).

Diante dos resultados verificados em relação a variabilidade espacial das formas e frações de P na área do módulo experimental de cultivo orgânico de hortaliças, sugere-se que o manejo da fertilização ocorra com base na distribuição destes teores na área, uma vez que apresentam elevadas concentrações de P, inclusive disponível, em diversas porções dos mapas. Dessa forma, os resultados apresentados podem servir de base para uma gestão mais eficiente da fertilização do módulo, principalmente, em relação aos fertilizantes fosfatados. Além de altas concentrações de P disponível, a área apresenta conteúdo elevado de P lábil e moderadamente lábil, tanto em formas inorgânicas, quanto orgânicas, que por sua vez, podem ser uma fonte de P à medida que as concentrações de P disponível diminuem no solo.

4.6 CONCLUSÕES

O manejo adotado no módulo influencia a variabilidade espacial de todas as frações orgânicas e inorgânicas de P, de forma mais acentuada na lábil e moderadamente lábil, principalmente nas camadas superficiais do solo.

O solo estudado possui características que proporcionam baixa capacidade de adsorção de P, principalmente nas camadas superficiais.

As formas inorgânicas, orgânicas e residual de P apresentam dependência espacial para todas as profundidades, com dependência forte para a maioria das frações estudadas.

A matéria orgânica tem grande influência na distribuição espacial das frações de P, principalmente na forma de P_o , sendo mais evidente nas camadas superficiais do solo.

O P se acumula principalmente na forma inorgânica, apresentando maior participação no P total do solo, exceto na profundidade 0,20-0,40 m, em que P_o foi mais expressivo.

As formas de P_i e P_o moderadamente lábil se acumulam no solo de maneira mais expressiva. Já a fração moderadamente resistente de P_o apresenta menor participação no P total do solo.

A textura do solo influenciou a distribuição espacial do P em todas as frações, de maneira mais evidente nas camadas mais profundas do solo e nas frações de P mais recalcitrantes, uma vez que os teores lábeis diminuíram em função do maior percentual de argila.

O manejo de fertilização com P no módulo experimental deve ser realizado considerando zonas de manejo, uma vez que algumas regiões não necessitam de fertilização com P a curto prazo.

O P_o se apresenta como alternativa para um manejo mais eficiente de P, haja vista que, apesar de não ter sido a forma mais expressiva, apresenta boa participação no P total do solo, podendo representar uma fonte importante de P caso as concentrações de P disponível e P_i lábil diminuam.

4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A. C. F.; CÂNDIDO, C. S.; CARVALHO, C. S.; MONROE, P. H. M.; MOURA, E.G. Organic matter fraction and pools of phosphorus as indicators of the impact of land use in the Amazonian periphery. **Ecological Indicators**, v.30, p.158-164, 2013.

ALI, W.; NADEEM, M.; ASHIQ, W.; ZAEEM, M.; MOHIOUDIN, G.; RAJABI-KHAMSEH, S.; PHAM, T. H.; KACANAGH, V.; THOMAS, R.; CHEEMA, M. The effects of organic and inorganic phosphorus amendments on the biochemical attributes and active microbial population of agriculture podzols following silage corn cultivation in boreal climate. **Scientific Reports**, v.9, 17297, 2019.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711-728, 2013.

ALVAREZ V., V. H.; DIAS, L. E.; RIBEIRO JÚNIOR, E. S.; SOUZA, R. B.; FONSECA, C.A. **Métodos de análises de enxofre em solos e plantas**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2001. 131p.

ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T. G., ALVAREZ, V. H. (Eds). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa, MG, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.

ALVAREZ V.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. **Boletim Informativo**, v.25, n.1, p.27-33, 2000.

ANDRADE, A. T.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, N. V. Relação da aplicação de resíduos orgânicos, calcário e gesso com a adsorção de fósforo em solos de várzea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Paraná. **Anais...** Paraná: SBCS, 2001.

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; SILVA, D. M. P.; SILVA, D. A. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênico e não antropogênico na região de Manicoré, AM. **Bioscience Journal**, v.30, p.988-997, 2014.

AQUINO, B. F. **Conceitos fundamentais em fertilidade do solo**. Fortaleza: UFC, 2004.182p.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Conteúdo de nitrogênio total num solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, 235-239, 1997.

BAYUELO-JIMÉNEZ, J. S.; MURAOKA, T.; CRUZ-TORRES, E.; QUINTERO-PONCE, L.; PAREDES-GUTIERRÉZ, L. C.; ZAMAN, M. Phosphorus fractions and dynamics as affected by land-use changes in the Central Mexican highlands. **Soil Use and Management**, v.36, n.2, p.240-249, 2020.

BHATTI, J. S.; COMEFORD, N. B.; JOHTSON, C. T. Influence of oxalate and soil organic matter on sorption and desorption of phosphate onto a Spodic Horizon. **Soil Science Society of America Journal**, v.62, n.4, p.1089-1095, 1998.

BOECHAT, C. L.; SANTOS, J. A. G.; ACCIOLY, A. M. DE A. Net mineralization nitrogen and soil chemical changes with application of organic wastes with “Fermented Bokashi Compost”. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, n. 2, p. 257-264, jun. 2013.

BOGUNOVIC, I.; PEREIRA, P.; BREVIK, E. C. Spatial distribution of soil chemical properties in an organic farm in Croatia. **Science of the Total Environment**, v.584-585, p.535-545, 2017.

BOWMAN, R. A. A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and dilute base for soil organic phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, v.53, n.2, p.362-366, 1989.

BOWMAN, R. A.; COLE, C. V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. **Soil Science**, v.125, n.2, p.95-101, 1978.

BROWNLIE, W. J.; SUTTON, M. A.; REAY, D. S.; HEAL, K. V.; HERMANN, L.; KABBE, C.; SPEARS, B.M. Global actions for a sustainable phosphorus future. **Nature Foods**, v.2, p.71-74, 2021.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena**, v.100, p.100-106, 2013.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B; NOVACK, J. M; PARKIN, T. B; KARLEN, D. L.; TURCO R. F.; KNOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, v.58, p.1240-1248, 1994.

CAMPOS, M. C. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; MONTARANI, R. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.3, p.297-304, 2009.

CARVALHO, A. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; ALMONDES, Z. A. P.; FIGUEIREDO, C. C. Forms of phosphorus in an oxisol under different soil tillage systems and cover plants in rotation with maize. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 972-979, 2014.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.8, p.1151-1159, 2002.

CARVALHO, L. A.; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C. A. da; CENTURION, J. F. Spatial variability of soil physical properties in two management systems in sugarcane crop. **Engenharia Agrícola**, v.32, n.1, p.60-68, 2012.

CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; MENDES, J. S. Adsorção de fósforo em materiais de Latossolo e Argissolo. **Caatinga**, v.20, n.3, p.104-111, 2007.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial de cobre e manganês em Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, v.40, n.2, p.211-218, 2009.

CHOJNACKA, K.; MOUSTAKAS, K.; WITEK-KROWIAK, A. Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy. **Bioresource Technology**, v.295, 12223, 2020.

CICHOTA, R.; LIER, Q. J. V. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção da água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.4, p.585-596, 2004.

CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212p. (Embrapa-CNPS. Documentos, 1).

CONDRON, L. M.; NEWMAN, S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. **Journal of Soils and Sediments**, v.11, p.830-840, 2011.

CORÁ, J. E.; ARAÚJO, A. V.; PEREIRA, G.T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.6, p.1013-1021, 2004.

CRUZ, J. S.; ASSIS JUNIOR, R. N.; MATIAS, S. S. R.; CAMACHO-TAMAYO, J. H.; TAVARES, R. C. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, n.2, p.271-278, 2010.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um latossolo vermelho distroférrico sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v.43, n.3, p.453-461, 2012.

DAVIS, J. C. **Statistics and data analysis in geology**. 2.ed., New York, John Wiley. 1986, 7646 p. 1986.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L. DE; BALIEIRO, F. DE C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAÚJO FILHO, J. C. DE; SANTOS, F. C. DOS; ALBUQUERQUE, M. R. DE. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1003-1020, 2016.

DONOGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; ALVAREZ, V. H.; KER, J. C.; FONTES, M. P. F. Fósforo remanescente em argila e silte retirados em Latossolos após pré-tratamentos na análise textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1785-1791, 2008.

FORNARA, D.A.; FLYNN, D.; CARUSO, T. Improving phosphorus sustainability in intensively managed grasslands: The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi. **Science of The Total Environment**, v.706, n.1, 135744, 2020.

FU, D.; XU, Z.; WU, X.; ZHAO, L.; ZHU, A.; DUAN, C.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Land use effects on soil phosphorus behavior characteristics in the eutrophic aquatic-terrestrial ecotone of Dianchi Lake, China. **Soil and Tillage Research**, v.205, 104793, 2021.

GATIBONI, L. C.; SCHMITT, D. E.; TIECHER, T.; VELOSO, M. G.; SANTOS, D. R.; KAMINSKI, J.; BRUNETTO, G. Plant uptake of legacy phosphorus from soils without P fertilization. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.119, p.139-151, 2021.

GATIBONI, L. C.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, A. F. C.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J.; LIMA, M. A. S. Phosphorus forms and availability assessed by ³¹P-NMR in successively cropped soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.36, p.2625-2640, 2005.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer V.7.02**. Surface Mapping System, Colorado, 2000.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.2, p.169-177, 2005.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística operacional**. Ministério das Minas e Energia/ Departamento de Produção Mineral, Brasília, 1988. 145p.

GU, S.; GRUAU, G.; DUPAS, R.; RUMPEL, C.; CRÈME, A.; FOVET, O.; GASCUEL-ODOUX, C.; JEANNEAU, L.; HUMBERT, G.; PETIJEAN, P. Release of dissolved phosphorus from riparian wetlands: evidence for complex interactions among hydroclimate variability, topography and soil properties. **Science of the Total Environment**, v.598, p.421-431, 2017.

HIRADATE, S.; UCHIDA, N. Effects of soil organic matter on pH-dependent phosphate sorption by soils. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.50, p.665-675, 2004.

HOU, E.; CHEN, C.; WEN, D.; LIU, X. Relationships of phosphorus fractions to organic carbon content in surface soils in mature subtropical forests, Dinghushan, China. **Soil Research**, v.52, n.1, p.55-63, 2014.

HUNT, J. F.; OHNO, T.; HE, Z.; HONEYCUTT, C. W.; DAIL, B. Inhibition of phosphorus sorption to goethite, gibbsite, and kaolin by fresh and decomposed organic matter. **Biology and Fertility of Soils**, v.44, 277-288, 2007.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 561 p.

JONES, T. A. Skewness and Kurtosis as criteria of normality in observed frequency distributions. **Journal of Sedimentary Research**, v.39, n.4, p.1622-1627, 1969.

KIFLU, A.; BEYENE, S.; JEFF, S. Fractionation and availability of phosphorus in acid soils of Hagereselam, Southern Ethiopia under different rates of lime. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v.4, p.1-7, 2017.

LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; BERNARDES, P. M.; FONSECA, A. S.; PEREIRA, J. M. S. Variabilidade espacial dos Percentis 75 da precipitação pluvial mensal no estado do Espírito Santo. **Energia na Agricultura**, v. 24, n. 5, p. 393-405, 2016.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Revista Árvore**, v.34, p.127-136, 2010.

LINDSAY, W. L.; MORENO, E. C. Phosphate phase equilibria in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.24, p.177-182, 1960.

LIN, V.S.; ROSNOW, J. J.; McGRADY, M.Y.; SMERCINA, D. N.; NUÑEZ, J. R.; RENSLOW, R. S.; MORAN, J. J. Non-destructive spatial analysis of phosphatase activity and total protein distribution in the rhizosphere using a root blotting method. **Soil Biology and Biochemistry**, v.146, 107820, 2020.

LÓPEZ-BUCIO, J. L.; M. de la VEJA, O. M. de la; GUEVARA-GARCÍA, A.; HERRERA-ESTRELLA L. Enhance phosphorus uptake in transgenic tobacco plants that overproduce citrate. **Natural Biotechnology**, v.18, p.450-453, 2000.

LU, X.; MAHDI, A. K.; HAN, X. Z.; CHEN, X.; YAN, J.; BISWAS, A.; ZOU, W. Long-term application of fertilizer and manures affect P fractions in Mollisol. **Scientific Reports**, v.10, 14793, 2020.

MACLAREN, T. I.; SMERNICK, R. J.; McLAUGHLIN, M. J.; DOOLETTE, A. L.; RICHARDSON, A. E.; FROSSARD, E. The chemical nature of soil organic phosphorus: A critical review and global compilation of quantitative data. **Advances in Agronomy**, v.160, n.1, p.51-124, 2020.

MAHARJAN, M.; MARANGUIT, D.; KUZYAKOV, Y. Phosphorus fractions in subtropical soils depending on land use. **European Journal of Soil Biology**, v.87, p.17-24, 2018.

MALIK, M. A.; MARSCHNER, P.; KHAN, K. S. Addition of organic and inorganic P sources to soil – Effects on P pools and microorganisms. **Soil Biology and Biochemistry**, v.49, p.106-113, 2012.

MARANGUIT, D.; GUILLAUME, T.; KUZYAKOV, Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. **Catena**, v.149, p.385-393, 2017.

MARGENOT, A. J.; PAUL, B. K.; SOMMER, R. R.; PULLEMAN, M. M.; PARIKH, S. J.; JACKSON, L. E.; FONTE, S. J. Can conservation agriculture improve phosphorus (P) availability in weathered soils? Effects of tillage and residue management on soil P status after 9 years in a Kenyan Oxisol. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.166, p.157-166, 2017.

MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.8, p.143-152, 2008.

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

MATA, M. G. F. **Qualidade do solo e avaliação microeconômica de um módulo experimental de produção orgânica intensiva de hortaliças**. 2012. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

MATA, M. G. F. **Um modelo experimental para avaliar a qualidade do solo e a viabilidade técnica e econômica de um sistema de produção orgânica intensiva de hortaliças**. 2016. 83 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016.

MATIAS, S. S. R.; NÓBREGA, J. C. A.; NÓBREGA, R. S. A.; ANDRADE, F. R.; BAPTISTEL, A.C. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo cultivado de modo convencional com soja no cerrado piauiense. **Revista Agro@ambiente On-line**, v.9, n.1, p.17-26, 2015.

MEMIAGHE, J. D. N.; CAMBOURIS, A. N.; ZIADI, N.; KARAM, A.; PERRON, I. Spatial variability of soil phosphorus indices under two contrasting grassland fields in Eastern Canada. **Agronomy**, v.11, p.1-17, 2021.

MOMTAZ, H. R.; GHASEMI, N.; SEPEHR, E.; MOUSAVIFARD, S. M. Spatial distribution of soil-available phosphorus and single-point phosphorus buffering index in the Khoy region, Iran. **Soil Use and Management**, v.33, p.13-24, 2017.

MONTEBELLER, C. A.; CEDDIA, M. B.; CARVALHO, D. F.; VIEIRA, S. R. FRANCO, E.M. Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas no Estado do Rio de Janeiro. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 426-435, 2007.

MOREIRA, L. F. L. M.; MOTA, F. O. B.; CLEMENTE, C. A.; AZEVEDO, B. M.; BOMFIM, G. V. Adsorção de fósforo em solos do estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v.37, n.7-12, 2006.

NASH, D. M.; HAYGARTH, P. M.; TURNER, B. L.; CONDRON, L. M.; McDOWELL, R.W.; RICHARDSON, A. E.; WATKINS, M.; HEAVEN, M. W. Using organic phosphorus to sustain pasture productivity: A perspective. **Geoderma**, v.221-222, p.11-19, 2014.

NEVES, H. H.; MATA, M. G. F.; GUERRA, J. G. M.; CARVALHO, D.F.; WENDROTH, O. O.; CEDDIA, M.B. Spatial and temporal patterns of soil water content in an agroecological production system. **Scientia Agrícola**, v.74, n.5, p.383-392, 2017.

NZIGUHEBA, G.; BÜNEMANN, E. K. Organic phosphorus dynamics in tropical agroecosystems. In: TURNER, B. L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. S., eds. **Organic phosphorus in the environmental**. Wallingford, CAB International, 2005. p.243-268.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

OLIVEIRA, J. J.; CHAVES, L. H. G.; QUEIROZ, J. E.; LUNA, J. G. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.4, p.783-789, 1999.

PAGE, K. L.; DANG, Y. P.; DALAL, R. C. The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical, and biological properties and yield. **Frontiers in Sustainable Systems**, v.4, p.1-17, 2020.

PARK, J. H.; LAMB, D.; PANEERSELVAM, P.; CHOPPALA, G.; BOLAN, N.; CHUNG, J.-W. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils. **Journal of Hazardous Materials**, v. 185, n. 2-3, p. 549-574, 2011.

PARTELLI, F. L.; BUSATO, J. G.; VIEIRA, H. D.; VIANA, A. P.; CANELLAS, L. P. Qualidade da matéria orgânica e distribuição do fósforo no solo de lavouras orgânicas de café Conilon. **Ciência Rural**, v.39, p.2065-2072, 2009.

PAUL, B. K.; VANLAUWE, B.; AYUKE, F.; GASSNER, A.; HOOGMOED, M.; HURISSO, T. T.; KOALA, S.; LELEI, D.; NDABAMENYE, T.; SIX, J.; PULLEMAN, M. M. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.164, p.14-22, 2013.

PAVINATO, P. S.; CHERUBIM, M. R.; SOLTANGHEISE, A.; ROCHA, G. C.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v.10, 15615, 2020.

PERIN, A.; SANTOS, R. H. S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J. G. M.; CECON, P. R. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.1, p.35-40, 2004.

PHIRI, S.; BARRIOS, E.; RAO, I. M.; SINGH, B. R. Changes in soil organic matter and phosphorus fractions under planted fallows and a crop rotation system on a Colombian volcanic-ash soil. **Plant and Soil**, v.231, p.211-223, 2001.

PIAN, L. B. **Fertilização de origem vegetal em atributos do solo e no desempenho agroeconômico de hortaliças em sistemas orgânicos**. 2019. 164 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2019.

RECENA, R.; CADE-MENUN, B. J.; DELGADO, A. Organic phosphorus forms in agricultural soils under mediterranean climate. **Soil Science Society of America Journal**, v.82, p.783-795, 2018.

RHEINHEIMER, D. S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

RHEINHEIMER, D. S.; FORNARI, M. R.; BASTOS, M. C.; FERNANDES, G.; SANTANNA, M. A.; CALEGARI, A.; CANALLI, L. B. S.; CANER, L.; LABANOWSKI, J.; TIECHER, T. Phosphorus distribution after three decades of different soil management and cover crops in subtropical region. **Soil and Tillage Research**, v.192, p.33-41, 2019.

RIGO, A. Z.; CORRÊA, J. C.; MAFRA, A. L.; HENTZ, P.; GROHSCOPF, M. A.; GATIBONI, L. C.; BEDENDO, G. Phosphorus fractions in soil with organic and mineral fertilization in integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.43, e0180130, 2019.

RINGEVAL, B.; AUGUSTO, L.; MONOD, H.; APELDOORN, D.; BOUWMAN, L.; YANG, X.; ACHAT, D. L.; CHINI, L. P.; OOST, K. V.; GUENET, B.; WANG, R.; DECHARME, B.; NESME, T.; PELLERIN, S. Phosphorus in agricultural soils: drivers of its distribution at the global scale. **Global Change Biology**, v.23, p.3418-3432, 2017.

ROWE, H.; WITHERS, P. J. A.; BAAS, P.; CHAN, N. L.; DOODY, D.; HOLIMAN, J.; JACOBS, B.; LI, H.; MACDONALD, G.K.; SHARPLEY, A. N.; SHEN, J.; TAHERI, W.; WALLENSTEIN, M.; WEINTRAUB, M. N. Integrating legacy soil phosphorus into sustainable nutrient management strategies for future food, bioenergy and water security. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.104, p.393-412, 2016.

SANTOS, V. R.; MOURA FILHO, G.; SANTOS, C. G.; SANTOS, M. A. L.; CUNHA, J. L. X. L. Contribuição de argilominerais e da matéria orgânica na CTC dos solos do estado de Alagoas. **Revista Caatinga**, v.22, n.1, p.27-36, 2009.

SANYAL, S. K.; De DATTA, S. K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advances in Soil Science**, v.16, p.1-120, 1991.

SCHONINGER, E.; GATIBOI, L. C.; ERNANI, P. R. Rhizosphere pH and phosphorus forms in an Oxisol cultivated with soybean, brachiaria grass, millet and sorghum. **Scientia Agricola**, v.69, p.259-264, 2012.

SEGUI, P.; NOBILI, M.; LEITA, L.; CERCIGNANI, G. A new index of humification. **Agrochimica**, v.30, p.175-179, 1986.

SHEN, J.; WANG, L.; JIAO, X.; MENG, F.; ZHANG, L.; FENG, G.; ZHANG, J.; YAUN, L.; MA, L.; HOU, Y.; ZHANG, T.; ZHANG, W.; LI, G.; ZHANG, K.; ZHANG, F. Innovations of phosphorus sustainability: implications for the whole chain. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v.4, n.4, p.321-331, 2019.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BLANCANUX, P.; LIMA, J. M.; CARVALHO, A. M. Rotação adubo verde-milho e adsorção de fósforo em um Latossolo Vermelho-Escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, p.649-654, 1997.

SILVA, P. C. M.; CHAVES, L. H. G. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em alissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.3, p.431-436, 2001.

SILVA, S. A.; SOUZA LIMA, J. S.; SOUZA, G. S.; OLIVEIRA, R. B.; SILVA, A. F. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 41, n. 1, p. 1-8, 2010.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, v.155, p. 55-66, 2010.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho Amarelo eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.2. p.309-319, 2004

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. S. G.; SIQUEIRA, D. S. Spatial variability of soil attributes and sugarcane yield in relation to topographic location. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.12, p.250-256, 2010.

STUTTER, M. I.; SHAND, C. A.; GEORGE, T. S.; BLACKWELL, M. S. A.; DIXON, L.; BOL, R.; MACKAY, L. R.; RICHARDSON, A. E.; CONDRON, L. M.; HAYGARTH, P. M. Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils. **Geoderma**, v.257-258, p.29-39, 2015.

SUN, W.; HUANG, B.; QU, M.; TIAN, K.; YAO, L.; FU, M.; YIN, L. Effect of farming practices on the variability of phosphorus status in intensively managed soils. **Pedosphere**, v.25, p.438-449, 2015.

SU, Y.; GABRIELLE, B.; BEILLOUIN, D.; MAKOWSKI, D. High probability of yield gain through conservation agriculture in dry regions for major staple Crops. **Scientific Reports**, v.11, 3344, 2021.

SVANBÄCK, A.; McKRACKIN, M. L.; SWANEY, D. P.; LINEFUR, H.; GUSTAFSSON, B. G.; HOWARTH, R. W.; HUMBORG, C. Reducing agricultural nutrient surpluses in a large catchment - Links to livestock density. **Science of The Total Environment**, v.648, p.1549-1559, 2019.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D. S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long-term experiment. **Soil and Tillage Research**, v.124, n.57-67, 2012.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, G. R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do estado de São Paulo. **Bragantia**, v.54, p.405-412, 1995.

VIEIRA, S. R.; MILLETE, J.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZZ, V.H.; SCHAEFER, C. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (Ed.). **Tópicos em Ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2002. vol.2, p.1-45, 2002.

WANG, C.; XUE, L.; JIAO, R. Soil phosphorus fractions, phosphatase activity, and the abundance of *phoC* and *phoD* genes vary with planting density in subtropical Chinese fir plantations. **Soil and Tillage Research**, v.209, 104946, 2021.

- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 1980, p.319-44.
- WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. In: STEWART B. A. (Ed.). **Advance in soil science**. New York, Springer-Verlag, 1985, p.1-70.
- WERNER, F.; HAYE, T. R.; SPIELVOGEL, S.; PRIETZEL, J. Small-scale spatial distribution of phosphorus fractions in soils from silicate parent material with different degree of podzolization. **Geoderma**, v.302, p.52-65, 2017.
- WILSON, H.F.; SATCHITHANANTHAM, S.; MOLIN, A.P.; GLENN, A.J. Soil phosphorus spatial variability due to landform, tillage, and input management: A case study of small watersheds in southwestern Manitoba. **Geoderma**, v.280, p.14-21, 2016.
- WU, T.; LIU, W.; WANG, D.; ZOU, Y.; LIN, R.; YANG, Q.; GBOKIE JUNIOR, T.; BUGHIO, M. A.; LI, Q.; WANG, J. Organic management improves soil phosphorus availability and microbial properties in a tea plantation after land conversion from longan (*Dimocarpus longan*). **Applied Soil Ecology**, v.54, 103642, 2020.
- XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S. Phosphorus fractionation in a sandy soil under organic agriculture in Northeastern Brazil. **Geoderma**, v.151, p.417-423, 2009.
- XOMPHOUTHEB, T.; JIAO, S.; GUO, X.; MABAGALA, F. S.; SUI, B.; WANG, H.; ZHAO, L.; ZHAO, X. The effect of tillage systems on phosphorus distribution and forms in rhizosphere and non-rhizosphere soil under maize (*Zea mays* L.) in Northeast China. **Scientific Reports**, v.10, 6574, 2020.
- XU, X.; HE, P.; PAMPOLINO, M. F.; QIU, S.; ZHAO, S.; ZHOU, W. Spatial variation of yield response and fertilizer requirements on regional scale for irrigated rice in China. **Scientific Reports**, v.9, p.3589, 2019.
- YANG, X.; CHEN, X.; YANG, X. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. **Soil and Tillage Research**, v.187, p.85-91, 2019.
- ZAIA, C. F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; GAMA-RODRIGUES, E.F. Formas de fósforo no solo sob leguminosas florestais, floresta secundária e pastagem no norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.3, p.1191-1197, 2008.
- ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; ZANÃO, M. P. C.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um Latossolo em sistema de plantio direto. **Revista Ceres**, v.57, n.3, p.429-438, 2010.
- ZHANG, S.; HUFFMAN, T.; ZHANG, X.; LIU, W.; LIU, Z. Spatial distribution of soil nutrient at depth in black soil of Northeast China: a case study of soil available phosphorus and total phosphorus. **Journal of Soils and Sediments**, v.14, p.1775-1789, 2014.

ZHANG,W.; ZHANG, Y.; AN, Y.; CHEN, X. Phosphorus fractionation related to environmental risks resulting from intensive vegetable cropping and fertilization in a subtropical region. **Environmental Pollution**, v.269, 116098, 2021.

ZHOU, X.; RHUE, R. D.; HARRIS, W. G. Phosphorus sorption characteristics of Bh and Bt horizons from sandy coastal palin soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, n.5, p.1364-1369, 1997.

ZHU, J.; LI, M.; WHELAN, M. J. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: a review. **Science of the Total Environment**,v.612, p.522-537, 2018.

5 CONCLUSÕES GERAIS

De acordo com os resultados verificados no estudo é possível afirmar que as diferentes condições de solo, principalmente em relação a textura e teores de matéria orgânica pode influenciar na variabilidade espacial de P. Além disso, o manejo adotado na área influencia a variabilidade espacial das diferentes frações de P, de maneira mais expressiva nas camadas mais superficiais do solo. A variabilidade espacial do P deve ser levada em consideração no planejamento de fertilização na área estudada, pois essas informações podem ser usadas para otimizar as aplicações de fertilizantes, aumentando a produtividade das culturas, reduzindo os custos e os possíveis problemas ambientais advindos de práticas de fertilização.

Diante dos resultados em relação a variabilidade espacial das formas e frações de P na área do módulo experimental de cultivo orgânico de hortaliças, sugere-se que o manejo da fertilização ocorra com base na distribuição destes teores na área, uma vez que apresentam elevadas concentrações de P, inclusive disponível, em diversas porções dos mapas.

Os resultados apresentados podem servir de base para uma gestão mais eficiente da fertilização do módulo, principalmente, em relação aos fertilizantes fosfatados. Além de altas concentrações de P disponível, a área apresenta conteúdo elevado de P lábil e moderadamente lábil, tanto em formas inorgânicas, quanto orgânicas, que por sua vez, podem ser uma fonte de P à medida que as concentrações de P disponível diminuam no solo.

O conhecimento da dinâmica das formas de P é importante para um manejo eficiente da adubação fosfatada, principalmente nos solos tropicais, onde o P orgânico vem ganhando cada vez mais importância, fato que ficou evidente no estudo da análise bibliométrica da produção científica sobre fracionamento de P com base na fração orgânica. Os resultados deixam evidente a preocupação, a nível global, em relação ao manejo inadequado da adubação fosfatada e seus efeitos nos solos.

Os principais problemas debatidos nos trabalhos recuperados estão relacionados à aplicação de fertilizantes fosfatados e seus efeitos na longevidade das reservas de fosfato; a fixação de P no solo; eutrofização de corpos hídricos e o fato do P ser um recurso finito e insubstituível. Com base no estudo bibliométrico, é possível concluir que o P orgânico solo representa um tema científico relevante, que deve ser considerado por governos e países em suas políticas científicas e tecnológicas.