



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

JOÃO PAULO COSTA CARNEIRO

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM LATOSSOLO SOB
DIFERENTES SISTEMAS DE LONGA DURAÇÃO**

Londrina
2015

JOÃO PAULO COSTA CARNEIRO

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM LATOSSOLO SOB
DIFERENTES SISTEMAS DE LONGA DURAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Agronomia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria de Fátima Guimarães.
Co-Orientador: Dr. Julio Cezar Franchini.

Londrina
2015

**Catlogação elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da
Universidade Estadual de Londrina.**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

C289d Carneiro, João Paulo Costa.

Disponibilidade de fósforo em latossolo sob diferentes sistemas de longa
duração / João Paulo Costa Carneiro. – Londrina, 2015.
68 f. : il.

Orientador: Maria de Fátima Guimarães.

Coorientador: Julio Cezar Franchini.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina,
Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2015.
Inclui bibliografia.

1. Solos – Teor de fósforo – Teses. 2. Fertilizantes fosfatados – Teses. 3. Plantio
direto – Teses. 4. Rotação de cultivos – Teses. I. Guimarães, Maria de Fátima.
II. Franchini, Julio Cezar. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de
Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU 631.416.2

JOÃO PAULO COSTA CARNEIRO

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM LATOSSOLO SOB
DIFERENTES SISTEMAS DE LONGA DURAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Maria de Fátima Guimarães
Universidade Estadual de Londrina-UEL

Dr. Adilson de Oliveira Junior
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-
Embrapa Soja

Prof.Dr. Osmar Rodrigues Brito
Universidade Estadual de Londrina-UEL

Prof. Dr. João Tavares Filho
Universidade Estadual de Londrina-UEL

Prof. Dr. Marco Antonio Gandolfo
Universidade Estadual do Norte Paraná-UENP

Londrina, 18 de fevereiro de 2015.

Dedico

Aos meus pais João Carlos e Magda pelo amor e pelo trabalho exaustivo em prol de meus estudos. Aos meus queridos avôs Wilson (in memoriam) e Dercy pela sabedoria e humildade passada por gerações.

Ofereço

Ao Julio Cezar Franchini e a Maria de Fátima Guimarães pela companhia, orientação e confiança depositada durante a condução deste experimento.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, João Carlos e Magda, minha eterna admiração e meu muito obrigado. As renúncias às suas próprias vidas foram tidas como devoção à minha, abrindo a porta do meu futuro com o tesouro mais importante que poderiam me dar: o estudo.

Aos meus familiares: Caroline, Gabriel, Dercy, Aparecida, Celso e Wilsinho, que tanto me apoiaram nesta jornada, me reerguendo por meio de seus apoios incondicionais. Nos momentos importantes compreenderam minha ausência, nos dias de fracasso e derrota enxugaram minhas lágrimas, dizer apenas obrigado não é suficiente para expressar minha gratidão.

A minha grande companheira Patrícia Meiriele Marini, que me acompanhou desde o início desta jornada chamada Pós-Graduação. Agradeço por todo o auxílio em todas as atividades que realizei durante o Mestrado, a convivência diária, os ótimos momentos que passamos juntos, os finais de semana no Iapar e as viagens para nossas casas e todas as experiências compartilhadas durante este período. Muito obrigado Pati, você é uma pessoa incrível.

Aos meus queridos avôs: Wilson, Celina e João Walmir, que apesar de não estarem mais presentes nesta existência, sinto que foram importantes para o meu crescimento pessoal e agora compartilham de minha vitória seja de onde estiverem.

Aos irmãos da *PKN*, sediada no pacato povoado mineiro conhecido como Alfenas.

Aos meus grandes Mestres e Orientadores Profa. Maria de Fátima Guimarães e Dr. Júlio Cezar Franchini, por aceitar a tarefa divina de me instruir nessa importante etapa que encontro; espero que não tenha sido uma decepção. Sentirei eternamente grato por ter compartilhado seus valiosos conhecimentos. Também a todos os funcionários da Embrapa Soja e da UEL pelo apoio na execução deste trabalho.

Aos pesquisadores e amigos *Embrapianos* e *Iaparenses*: Dr. José Francirlei de Oliveira, Dr. Adilson de Oliveira Junior, Dr. Esmael Lopes dos Santos, Donizete Loni, Joviano Kleinert, Dra. Mariana Germano, Dr. Henrique Debiasi, e Dra. Andressa Machado pelo apoio incrível neste Projeto.

Aos funcionários da área de manejo do solo da Embrapa Soja, Luiz Gustavo Garbelini, João Macedo- Póla, Agostinho, Elizeu, Sr. Ildefonso, Mariluci Pires, Dudinha, pelo suporte técnico para realização das coletas.

Aos demais colegas, pelo companheirismo e convivência amigável.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes-
pela concessão da bolsa de estudo.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Soja - pela
disposição de sua extraordinária infraestrutura para realização deste estudo.

A Nossa Senhora Aparecida, São Francisco de Assis, Santa Rita de Cássia e
todos os Santos ofereço minha devoção, que sempre me conduziram e intercederam em minhas
realizações. Sem este alicerce divino, nenhuma conquista seria possível.

A Deus, que me deu a vida. Sei que nos momentos difíceis uma força maior
me carregava e me fazia seguir. Hoje, mais do que nunca compreendo a existência dessa força
e tenho certeza que Ele continuará ao meu lado.

“A mind needs books as a sword needs a whetstone, if it is to keep its edge.” Tyrion Lannister

George R.R. Martin, A Game of Thrones.

CARNEIRO, João Paulo Costa. **Disponibilidade de fósforo em Latossolo sob diferentes sistemas de manejo de longa duração**. 2015. 68 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

RESUMO

O fósforo (P) é considerado elemento essencial e insubstituível às plantas. As reservas desse elemento são finitas, a evolução do uso de fertilizantes fosfatados no Brasil é crescente e a tendência é de aumentos consideráveis nos próximos anos. Ademais, o P pode ser fixado nos solos devido à adsorção deste íon a óxidos e hidróxidos de Fe e Al, sendo que este problema torna-se mais grave em solos tropicais muito intemperizados. Por isto, há necessidade do desenvolvimento de trabalhos científicos para aumentar a eficiência de utilização de P nos diferentes sistemas de produção agrícola. Este trabalho teve como objetivo central avaliar os teores de P disponível no solo, ao longo de 24 anos, em diferentes sistemas de manejos e de culturas, em um Latossolo Vermelho Distroférico (LVd), na região sul do Brasil [clima Cfa (subtropical úmido)]. E os objetivos específicos foram: (i) avaliar a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e a energia de ligação de um Latossolo Vermelho muito argiloso, sob diferentes sistemas de manejo do solo e de culturas, num período de 24 anos; e (ii) estimar as quantidades exportadas de P nos grãos das culturas de soja, trigo e milho e a eficiência relativa do uso deste elemento nos diferentes sistemas de manejo, em sucessão e rotação de culturas. O delineamento foi de blocos ao acaso, com quatro repetições em esquema fatorial 3x2, sendo constituído por três manejos do solo [sistema de plantio direto (PD), sistema de plantio direto escarificado (PDesc) e plantio convencional (PC)] e dois sistemas de culturas [sucessão (SUC) e rotação (ROT)]. A menor intensidade de revolvimento do solo no PD aumentou os teores de COT e CTC, reduzindo-se, assim, a energia de ligação e aumentando os teores de P disponível para as plantas em relação ao PDesc e PC. No PC não ocorreu aumento significativo dos teores de P disponível ao longo dos 24 anos na primeira camada. Apesar do aumento de P disponível, o plantio direto não aumentou a eficiência de exportação de P pelas plantas em relação aos outros sistemas de manejo. Nesse sentido, a maior influência sobre a extração de P pelas plantas foi ocasionada pelo sistema de manejo de culturas, com maior eficiência de exportação naqueles que utilizaram a rotação. A escarificação periódica do solo não alterou os teores de P disponível ao longo dos 24 anos de manejo e apresentou os menores teores de P disponível em relação ao plantio direto contínuo (PD) e o plantio convencional (PC), não apresentando qualquer vantagem para o balanço da exportação de P em relação ao PD contínuo.

Palavras-chave: Plantio direto. Plantio convencional. Rotação de culturas. Adsorção de fosfato. Energia de ligação de fosfato.

CARNEIRO, João Paulo Costa. **Phosphorus availability in an Oxisol under different long-term management systems.** 2015. 68 p. Dissertation (Master in Agronomy) - State University of Londrina, Londrina, 2015.

ABSTRACT

The phosphorus (P) is considered essential and irreplaceable element for plants. The reserves of this element is finite, the evolution of the use of phosphate fertilizers in Brazil is growing and the trend is considerable increases in the coming years. In addition, the P can be fixed in the soil due to adsorption of the ion to oxides and iron and aluminum hydroxides, and this problem becomes more severe in highly weathered tropical soils. Therefore, there is need to develop scientific studies to increase the efficiency of P utilization in different system of agricultural production. This work aimed mainly to evaluate the values of available phosphorus in the soil, over 24 years in different systems of soil management and cultures, in a Rhodic Eutrudox, in southern Brazil [CFa climate]. And the specific objectives were: (i) evaluate the maximum P adsorption capacity (MPAC) and the binding energy of an Oxisol clayey under different soil management systems and cultures, within 24 years; and (ii) estimate the amount of P in the exported soybean grains of wheat and maize and the relative efficiency of use of the element in different management systems, succession and crop rotation. The design was a randomized block with four replications in a factorial arrangement 3x2, consisting of three soil managements [no-till (NT), no-till with csideling (NTC) and conventional tillage (CT)] and two systems crops [succession (SUC) and rotation (ROT)]. The stabilization period occurred after 22 years of adoption of the NT and the least amount of soil disturbance in this system increased the TOC and levels of CEC, reducing the binding energy and increasing available P content to plants in relation to NTC and CT. On the PC there was no significant increase in P content available over the 24 years. Despite the increase in available P, the no till did not increase the export efficiency of P by plants, in relation to other management systems. In this sense, the greatest influence on the extraction of P by plants was caused by crop management system, with higher export efficiency in those using the rotation. Periodic soil scarification did not affect the values of available phosphorus over the 24 years of management and had the lowest values of available phosphorus in relatio to no till and conventional tillage, showing no advantage for the balance of exports of P in relation to NT.

Key words: No-till Conventional tillage. Crop rotation. Phosphorus adsorption. Adsorption energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 3.1 -** Dendrogramas dos teores médios entre ROT e SUC de P_M , ao longo dos 24 anos do experimento, em PD(a), PDesc(b) e PC(c) 35
- Figura 3.2 -** Correlação entre a capacidade de troca de cátions (CTC) e os teores de carbono orgânico total (COT) (a); dos teores de P_M com os valores de COT (b); e, da energia de ligação de P com os teores de P_M do solo, a figura superior à direita apresenta as isotermas de adsorção de P no PC e PD em SUC e ROT(c) na camada 0,00-0,10 m das amostras de Latossolo Vermelho utilizado neste estudo 38
- Figura 4.1-** Precipitação média anual ao longo dos 24 anos do experimento..... 48

LISTA DE TABELAS

| | | |
|---------------------|---|----|
| Tabela 3.1 - | Atributos químicos das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m, após 24 anos (Dezembro/2013) | 27 |
| Tabela 3.2 - | Descrição dos manejos de solo | 28 |
| Tabela 3.3 - | Sistemas de rotação (ROT) e sucessão (SUC) de culturas em função dos ciclos de cultivo | 28 |
| Tabela 3.4 - | Teores de carbono orgânico total (COT), pH e capacidade de troca de cátions (CTC) das camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m após 24 anos (coleta realizada em 2013) de plantio direto (PD), plantio direto escarificado (PDesc) e plantio convencional (PC) em rotação (ROT) e sucessão (SUC) de culturas | 31 |
| Tabela 3.5 - | Capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) nos diferentes sistemas de manejos e de culturas nas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m..... | 33 |
| Tabela 3.6 - | Variação dos teores de P_M ao longo de 24 anos nas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m nos sistemas de plantio direto (PD), plantio direto escarificado (PDesc) e plantio convencional (PC) em rotação (ROT) e sucessão (SUC) de culturas | 36 |
| Tabela 4.1 - | Descrição dos manejos de solo realizados nos tratamentos | 43 |
| Tabela 4.2 - | Sistemas de rotação (ROT) e sucessão (SUC) de culturas em função dos ciclos de cultivo | 44 |
| Tabela 4.3 - | Fertilização utilizada para soja, trigo e milho ao longo de 24 anos | 44 |
| Tabela 4.4- | Eficiências médias de exportação de P no plantio direto (PD), direto escarificado (PDesc) e convencional (PC), em sucessão (SUC) e rotação (ROT) de culturas | 46 |
| Tabela 4.5 - | Exportação média de P nos sistemas de sucessão (SUC) e rotação (ROT) de culturas em plantio direto (PD), direto escarificado (PDesc) e convencional (PC) | 47 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 15 |
| 2.1 | Fósforo: Recurso Finito e Essencial aos Seres Vivos | 15 |
| 2.2 | Fósforo no Solo e Adsorção | 17 |
| 2.3 | Disponibilidade de P em Relação ao Manejo do Solo | 19 |
| 2.4 | Sucessão e Rotação de Culturas | 21 |
| 3 | ARTIGO A | 24 |
| 3.1 | RESUMO | 24 |
| 3.2 | ABSTRACT | 25 |
| 3.3 | INTRODUÇÃO | 25 |
| 3.4 | MATERIAL E MÉTODOS | 26 |
| 3.4.1 | Histórico da área experimental..... | 27 |
| 3.4.2 | Caracterização e delineamento..... | 27 |
| 3.4.3 | Coleta das amostras..... | 29 |
| 3.4.4 | Análises laboratoriais | 29 |
| 3.4.5 | Análises estatísticas..... | 30 |
| 3.5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 30 |
| 3.5.1 | Atributos químicos dos diferentes sistemas de manejo..... | 30 |
| 3.5.2 | Classes de disponibilidade de PM..... | 32 |
| 3.5.3 | Capacidade máxima de adsorção de P | 32 |
| 3.5.4 | Teores de PM nos diferentes sistemas de manejo do solo | 33 |
| 3.6 | CONCLUSÕES..... | 39 |
| 4 | ARTIGO B – BALANÇO DA EXPORTAÇÃO DE FÓSFERO EM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO E DE CULTURAS AO LONGO DE 24 ANOS NO SUL DO BRASIL | 40 |
| 4.1 | RESUMO | 40 |
| 4.2 | ABSTRACT | 41 |
| 4.3 | INTRODUÇÃO | 41 |
| 4.4.3 | Cálculo da eficiência relativa de uso do P pelas culturas nos | |

| | | |
|----------|---|----|
| | diferentes sistemas | 44 |
| 4.5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 45 |
| 4.5.2 | Balanço da extração de P, ao longo dos anos, nos diferentes sistemas de manejo e culturas..... | 46 |
| 4.6 | CONCLUSÕES | 49 |
| 5 | CONCLUSÕES GERAIS | 50 |
| 6 | ANEXO | 51 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 62 |

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é considerado elemento vital para todos os seres vivos, sendo este fato demonstrado um século antes do estabelecimento de metodologias pelo pesquisador alemão Justus Von Liebig (STAUFFER; SULEWSKI, 2004). Em plantas, este nutriente desempenha funções imprescindíveis na fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia, divisão e no crescimento celular. Além disto, está envolvido nos processos de crescimento e desenvolvimento de raízes e na melhoria da qualidade de frutos e grãos (MALAVOLTA, 1999; NOVAIS *et al.*, 2007).

A manutenção de teores adequados de P disponível no solo é importante para a garantia do desenvolvimento vegetal, sendo que este depende de um programa de fertilização fosfatada, que seja, pelo menos, capaz de repor as quantidades removidas deste nutriente do solo. Pois, o P, é considerado elemento essencial e insubstituível às plantas cultivadas, tornando-se imprescindível para a obtenção de boas produtividades (MALAVOLTA, 1999).

As reservas de P são finitas e estão se esgotando (FIXEN, 2009), principalmente, as de rochas sedimentares que possuem maior eficiência agrônômica (ASHLEY; CORDELL; MAVINIC, 2011). A evolução do uso de fertilizantes fosfatados no Brasil é crescente e a tendência é de aumentos consideráveis nos próximos anos (MALAVOLTA, 1999). Por isto, há necessidade do desenvolvimento de trabalhos científicos para aumentar a eficiência de utilização de P nos diferentes sistemas de produção agrícola. A avaliação desta eficiência é fundamental para racionalização do uso de fertilizantes fosfatados, resultando em benefícios ambientais e econômicos (FRANCHINI *et al.*, 2011).

Ademais, o P pode ser fixado nos solos devido à adsorção deste íon a óxidos e hidróxidos de Fe e Al. Este evento torna-se mais grave em solos tropicais bastante intemperizados, pois são ricos em minerais como a caulinita, hematita, gibsitita e goethita, que apresentam grupos de Fe-OH ou Al-OH. Nestes grupos, o fosfato pode ser adsorvido por meio das trocas de ligantes, reduzindo-se, assim, a disponibilidade deste nutriente no solo (NOVAIS; SMYTH, 1999; RHEINHEMER, 2000). Outro mecanismo de retenção de P, que pode ocorrer nos solos, é a precipitação, que ocorre devido à reação entre o fosfato e formas iônicas de Fe, Al e Ca, formando compostos pouco solúveis (SAMPLE *et al.*, 1980).

A busca por sistemas de manejo mais eficientes na utilização de P é fundamental para a sustentabilidade da produção agrícola. Entre estes, o sistema de plantio direto (SPD) destaca-se pelo mínimo revolvimento do solo, uso de rotação de culturas e

manutenção permanente da cobertura vegetal. Neste sistema, ocorre acúmulo de matéria orgânica no solo (MOS) e de P nos tecidos vegetais. Após a decomposição destes resíduos, ocorrerá o acréscimo de P, principalmente, nas camadas mais superficiais do solo. Além disso, o menor revolvimento proporciona um rearranjo estrutural e aumento da porosidade, garantindo, assim, melhores condições para o desenvolvimento radicular das plantas cultivadas. Além disso, a manutenção dos resíduos vegetais na superfície e, conseqüentemente, incremento dos teores de carbono (C), contribui para a redução na intensidade da adsorção deste elemento no solo (FRANCHINI *et al.*, 2011).

Entretanto, nos sistemas de plantio convencional (SPC), caracterizados por constantes operações de revolvimento do solo como aração e gradagens, a intensificação do processo de adsorção reduz a disponibilidade de P às plantas, devido ao maior contato do íon fosfatado com a superfície do coloide inorgânico (LOPES *et al.*, 2004). Nestes sistemas de manejo, ocorre a decomposição mais rápida da MOS em comparação ao SPD, prejudicando, assim, o acúmulo de frações orgânicas de P no solo.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo principal avaliar os teores disponíveis de P em um Latossolo Vermelho muito argiloso, ao longo de 24 anos, em diferentes sistemas de manejos e de culturas.

As hipóteses dos artigos que compõem este trabalho (artigo A e B) foram que: (i) a intensidade de revolvimento do solo, determinada por sistemas de manejo como o plantio direto e plantio convencional, interfere na disponibilidade de P no solo ao longo do tempo; (ii) o aumento do teor de matéria orgânica na camada superficial no plantio direto contribui para a redução do processo de adsorção de íons fosfato ao longo do tempo, aumentando, assim, a eficiência do uso deste nutriente e (iii) o sistema de sucessão e rotação de culturas interfere na disponibilidade de P no solo ao longo do tempo.

Além do objetivo principal, os objetivos específicos foram: (i) avaliar a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e a energia de ligação de um Latossolo Vermelho muito argiloso, sob diferentes sistemas de manejo do solo e de culturas, num período de 24 anos; e (ii) estimar as quantidades exportadas de P nos grãos das culturas de soja, trigo e milho e a eficiência relativa do uso deste elemento nos diferentes sistemas de manejo, em sucessão e rotação de culturas, ao longo de 24 anos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FÓSFORO: RECURSO FINITO E ESSENCIAL AOS SERES VIVOS

O P, elemento químico não metal de massa atômica 31, é componente fundamental de todos os seres vivos, fato demonstrado um século antes do estabelecimento de metodologias por Justus Von Liebig. O P é incorporado na estrutura genética (ácido desoxirribonucleico - DNA e ribonucleico - RNA), participante na produção, transferência e armazenamento de energia em diversos processos biológicos via adenosina trifosfato (ATP) e nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato reduzido (NADPH) (MALAVOLTA, 1999).

Nas plantas, este nutriente é imprescindível na fotossíntese, respiração, transferência de genes e reprodução. As interações do P com outros nutrientes ocorrem no solo ou nas plantas, sendo que nestas últimas podem acontecer nos processos de absorção, transporte ou no metabolismo deste nutriente. Os teores de P nas plantas oscilam de 0,5 a 3,0 g kg⁻¹ de P, sendo que os níveis considerados satisfatórios estão entre 1,0 a 1,5 g kg⁻¹. Estas absorvem a maior parte deste macronutriente como ânion monovalente – ortofosfato biácido (H₂PO₄⁻) e, em menores proporções, como ânion bivalente – ortofosfato monoácido (HPO₄²⁻) (ANGHINONI; BISSANI, 2004; DECHEN; NACHITIGALL, 2007).

A deficiência de P pode ocasionar perdas de rendimento das culturas, e os principais sintomas são a diminuição do porte, presença de folhas retorcidas e áreas necrosadas em caules e frutos. As folhas com deficiência apresentam coloração púrpura ou avermelhada e, conseqüentemente, pode ocorrer atraso na maturação de frutos e grãos (DECHEN; NACHITIGALL, 2007).

Por este motivo, manter as culturas com níveis satisfatórios de P é crucial para obtenção de boas produtividades, garantindo a qualidade de frutos e grãos. Como exemplo, plantas de milho com teores ideais de P apresentaram maiores quantidades de óleo nos grãos e menor umidade. Ademais, em plantas de soja, o equilíbrio nutricional deste elemento, diminui, consideravelmente, a porcentagem de grãos enrugados e doentes (MUNSON, 1978; SÁ; BUZZETI, 1994).

Dentre os fertilizantes minerais, os fosfatados são os mais utilizados em solos tropicais para nutrição de plantas (RAIJ, 1991). Contudo, as reservas de rochas sedimentares fosfáticas estão se esgotando. Em contrapartida, a evolução do uso dos

fertilizantes fosfatados no Brasil é crescente, e a tendência é de aumentos consideráveis nos próximos anos.

Segundo Johnston (2000), é muito difícil obter uma estimativa confiável sobre as reservas de rochas fosfáticas, devido às previsões incertas do consumo desse nutriente no futuro, às mudanças nas tecnologias de extração e nos custos de produção destes fertilizantes e ao excesso de confidencialidade das empresas e países portadores destas reservas. Entretanto, dados do U.S. Geological Survey, sobre bases de reservas mundiais de P, evidenciam que estas seriam suficientes para os próximos 240 anos de exploração, admitindo-se a taxa de consumo atual (ISHERWOOD, 1999). Todavia, estimativas mais recentes sobre estas reservas mundiais, com viabilidade econômica de exploração, demonstram que estas seriam suficientes somente para os próximos 36 anos de exploração (VANCE; UHDESTONE; ALLAN, 2003), comprovando-se, assim, a afirmação descrita por Malavolta (2004):

[...] a humanidade poderá crescer enquanto houver no solo fósforo para ser aproveitado e enquanto o homem puder transferir esse elemento da litosfera para a biosfera servindo como comida insubstituível para a planta e para os animais, pois o fósforo é vida e sem ele teríamos um planeta silencioso.

Entretanto, para atender a demanda crescente de alimentos, energia e fibras torna-se imprescindível o aumento da produtividade das culturas e conseqüentemente da fertilização fosfatada, pois sem P não há células, plantas, nem grãos (STAUFFER; SULEWSKI, 2004).

Em parâmetros mundiais, o P é considerado como limitante no uso de 5,7 bilhões de hectares de terras consideradas agricultáveis (HINSINGER, 2001). Sendo assim, pode-se confirmar a contradição existente entre a essencialidade deste elemento e a disponibilidade limitada no ambiente, pois o P é considerado recurso insubstituível e finito (GLASS; BEATON; BOMKE, 1980). Mas, ainda são necessários estudos visando o aumento da eficiência do uso do P pelas plantas cultivadas, buscando sistemas de produção mais sustentáveis capazes de repor as quantidades removidas deste nutriente no solo (FIXEN, 2009; ASHLEY; CORDELL; MAVINIC, 2011).

2.2 FÓSFORO NO SOLO E ADSORÇÃO

O teor médio de P na litosfera é de $2,8 \text{ g kg}^{-1}$ de P_2O_5 , entretanto, no solo este valor encontra-se entre 0,2 e 0,8 g de P kg^{-1} (FASSBENDER, 1994). Este elemento está distribuído nos minerais, rochas e nos organismos vivos. No solo, pode ser encontrado em formas orgânicas e inorgânicas, sendo que as reações deste elemento estão associadas aos fatores intensidade (I), quantidade (Q) e capacidade (C), em que, I refere-se ao P em solução, Q ao P denominado lábil e C a capacidade tampão desse nutriente (NOVAIS; SMYTH, 1999).

No solo, o P está na fase sólida e líquida, ou seja, adsorvido ou livre na solução. Assim, como o solo é constituído por complexos orgânicos e inorgânicos, o P também se apresenta nas formas orgânicas e inorgânicas sendo que o P orgânico (P_o) representa de 15 a 80% do P_{total} , podendo estar na forma de fosfolipídeos, ácidos nucleicos e fosfatos de inositol (DECHEN; NACHITIGALL, 2007).

O ortofosfato, H_2PO_4^- , apresenta coeficiente de difusão em água de aproximadamente $0,89 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$, e, no solo, este valor encontra-se entre 1×10^{-5} e $5 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$, portanto, pode-se concluir que este ânion apresenta baixa mobilidade. Estudos comprovaram que este elemento caminha distâncias de 0,083 e 0,0059 cm em 4 dias (BARBER, 1980).

Como o contato entre o P, presente na solução do solo, e as raízes se faz quase que exclusivamente por difusão (aproximadamente 93%) - processo em que este elemento caminha a curtas distâncias em fase aquosa estacionária - torna-se, portanto, fundamental a presença de pelos radiculares para absorção deste nutriente, além da manutenção dos teores de umidade do solo. A absorção do P pode ser resumida em que o P, encontrado na solução do solo, segue para o espaço intercelular, em sentido ao plasmalema, citoplasma (organelas como mitocôndria e no núcleo), atingindo o tonoplasto e vacúolo (MALAVOLTA, 2004).

O pH do solo regula a disponibilidade das formas iônicas de P. Portanto, em condições de pH inferior a 7, ocorre a predominância de H_2PO_4^- , enquanto em condições de pH superior a este, têm-se a disponibilidade aumentada de HPO_4^{2-} . Em solos com valores de pH muito alcalino, a maior parte do P encontra-se na forma de PO_4^{3-} , sendo esta forma não absorvida pelas plantas (DECHEN; NACHITIGALL, 2007).

A maioria dos solos agricultáveis no Brasil possui níveis insatisfatórios de P disponível às plantas, como os do Cerrado que apresentam cerca de 2 mg kg^{-1} de P extraível

por Mehlich-1 em 92% das amostras analisadas (LOPES; COX, 1977). Solos muito intemperizados, como os Latossolos das regiões tropicais, possuem expressiva retenção de ânions (fosfato) devido à maior eletropositividade e menor capacidade de troca de cátions (CTC), tornando-se, assim, fortes drenos deste nutriente. O solo, quando se comporta desta forma, compete com a planta pelo P adicionado via fertilização mineral (NOVAIS; SMYTH, 1999), entretanto, em solos jovens, o P é repostado na solução graças à intemperização de fosfatos primários, como exemplo a apatita.

O processo de adsorção, em definição genérica, é caracterizado por reações físico-químicas ocorrentes nas interfaces da superfície (adsorvente) e da substância ou adsorvato (P). A adsorção de P ocorre em três estádios, sendo que o primeiro é determinado pela neutralização das cargas positivas (grupos OH^{2+} compartilhados por íons fosfatos); o segundo é caracterizado pela troca de ligantes e, o terceiro, definido por ligações de baixa energia de interação, como por exemplo, as ligações físicas de P com íons de Fe (RHEINHEMER, 2000).

O processo de adsorção específica de íons fosfato ocorre, principalmente, devido à troca de ligantes com grupos OH^- de superfícies dos óxidos e hidróxidos de Fe, Al e Ca e argilominerais (adsorvente). Sendo que este processo torna-se mais intensificado em solos tropicais muito intemperizados, principalmente nos mais argilosos, sobretudo onde há predominância de argilas do tipo 1:1 (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Embora este processo de adsorção seja favorável à utilização deste nutriente pelas plantas ao longo dos anos, a transformação do P em frações não-lábeis (processo nominado “envelhecimento”) é um evento adverso nos sistemas agrícolas atuais (NOVAIS *et al.*, 2007). Pois, a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) em solos brasileiros é de aproximadamente 4 Mg ha^{-1} (cerca de 80% de P aplicado é adsorvido), entretanto, o uso de fontes alternativas fosfatadas, com baixa solubilidade em água, pode ser mais eficiente em solos com esta elevada CMAP, como nos Latossolos e Argissolos (PROCHNOW, 2006). Um solo, com CMAP de $1,0 \text{ mg g}^{-1}$, apresenta potencial de fixação de 23 Mg ha^{-1} do fertilizante mineral superfosfato simples (considerado altamente solúvel em água), ou seja, pode fixar, aproximadamente, $4,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ de P_2O_5 (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Para a mensuração da CMAP no solo, necessita-se adicionar às amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) concentrações crescentes de P, e, após um período de agitação, determina-se a concentração desse elemento na solução denominada de equilíbrio ou sobrenadante. A diferença entre o teor adicionado e o da solução sobrenadante refere-se ao P adsorvido, e após este cálculo, os valores são ajustados em isotermas, como as de Langmuir

que permitem alcançar à CMAP e energia de adsorção destas amostras. Além disso, os resultados são dependentes da temperatura e do tempo de contato solução x solo (NOVAIS; SMYTH, 1999). Entre as isotermas utilizadas para predição da adsorção de P, destacam-se as de Langmuir, Freundlich, Temkin, Gunary e BET (NOVAIS *et al.*, 2007).

2.3 DISPONIBILIDADE DE P EM RELAÇÃO AO MANEJO DO SOLO

Os sistemas de manejo interferem no comportamento dos nutrientes no solo e na labilidade do P. Algumas práticas adotadas nestes sistemas, como o não revolvimento do solo, controle da erosão e manutenção dos resíduos vegetais na superfície, podem, por exemplo, reduzir o processo de adsorção específica de íons fosfato, aumentando, dessa forma, a eficiência da fertilização fosfatada (GATIBONI, 2003).

O SPD é considerado uma alternativa importante para a sustentabilidade dos agroecossistemas brasileiros (MUZILLI, 2000; 2002). Entretanto, no início, era considerado como uma simples técnica de controle da erosão hídrica do solo (LOPES *et al.*, 2004), evoluindo para um sistema complexo e ordenado de produção agrícola. A expansão da área agrícola manejada sob este sistema, estimada atualmente em 32 milhões de hectares (FEBRAPD; CONAB, 2014), só foi possível devido ao desenvolvimento tecnológico visando superar os problemas relacionados ao manejo e às adaptações realizadas para implantação deste sistema nas diferentes regiões do país.

O SPD é caracterizado pelo mínimo revolvimento do solo, uso de rotação de culturas e cobertura permanente, sendo que a disponibilidade de P às plantas, ao longo do tempo, deve ser satisfatória (FRANCHINI *et al.*, 2011). Neste sistema ocorre o acúmulo de MOS e reciclagem de nutrientes em formas disponíveis às plantas (LOPES *et al.*, 2004). O menor revolvimento do solo proporciona um rearranjo estrutural com aumento da porosidade, gerando, assim, melhores condições para o desenvolvimento radicular das plantas cultivadas (SÁ, 2004; FRANCHINI *et al.*, 2011). Além disso, no SPD, o acúmulo de resíduos de cobertura favorece a mobilização de cátions no solo (FRANCHINI *et al.*, 2003).

De outra forma, em SPC, caracterizado por constantes operações de revolvimento do solo como aração e gradagens, a intensidade do processo de adsorção interfere na disponibilidade de P às plantas. Estudos demonstram que operações de intensa mobilização do solo promovem maior contato entre os íons fosfato e a superfície do coloide inorgânico, favorecendo as reações de adsorção e, conseqüentemente, reduzem a

disponibilidade deste íon às plantas. Este processo agrava-se com a natureza da fração argila dos solos tropicais bastante intemperizados tipo 1:1 (como exemplo a caulinita), e, com a presença de óxidos e hidróxidos de Fe e Al. Nesses coloides, a formação de cargas negativas é dependente do pH, e em condições de acidez do solo ocorre predominância de cargas positivas e, conseqüentemente, aumento da afinidade entre os íons e as superfícies destes grupos (SÁ, 2004).

Em contrapartida, o acúmulo de P em camadas superficiais do solo é incrementado com a adoção de sistemas de manejo com menor revolvimento do solo (SANTOS; TOM, 2003). Ademais, este processo é intensificado com os anos de adoção destes sistemas. Estudos realizados na região dos Campos Gerais no estado do Paraná, manejada sob SPD com diferentes tempos de adoção, demonstraram o acúmulo de P nos primeiros 2,5 cm, comprovando-se, assim, tanto a baixa mobilidade quanto o acúmulo deste nutriente na superfície do solo (MUZILLI, 1982; SIDIRAS; PAVAN, 1985; SÁ, 1993). Isto ocorre devido à aplicação anual de fertilizantes fosfatados em sulco ou a lanço, à liberação de P orgânico (Po) pela decomposição dos resíduos vegetais presentes na superfície, além da menor fixação deste nutriente nesta camada mais superficial. Portanto, o aumento do tempo de adoção deste sistema pode proporcionar redução do uso de fertilizantes fosfatados, em comparação às áreas de SPC com intensa mobilização do solo (SÁ, 2004).

O emprego do SPD, por longos períodos, incrementou o Po da camada superficial de solos com baixos níveis de argila e óxidos. Pois, o não revolvimento reduz as taxas de decomposição da MOS, aumentando, assim, os teores de Po lábil e moderadamente lábil. Ao contrário do que acontece em solos mais argilosos e ricos em óxidos de Fe, onde mesmo com a adoção deste sistema por muitos anos, observa-se pouca modificação nos teores de MOS e Po quando comparados ao SPC (RHEINHEIMER; ANGHINONI; CONTE, 2000). Outros estudos demonstram que períodos de adoção de SPC geram quedas significativas nos teores de MOS (BAYER *et al.*, 2000; SÁ *et al.*, 2001), por outro lado, o acúmulo de MOS, em SPD, deve-se às maiores taxas de adição e menores perdas por processos erosivos e não revolvimento do solo. Em um experimento de longa duração, Sá (2001) comprovou que a variabilidade dos atributos químicos do solo aumenta com o tempo de adoção do SPD no Paraná.

No SPD, os ácidos orgânicos de baixo peso molecular, resultantes dos processos de decomposição dos resíduos orgânicos, da exsudação radicular e da síntese microbiana, estabelecem complexos com o Fe e AL, além de serem adsorvidos às superfícies dos óxidos que podem bloquear os sítios de adsorção de P (RHEINHEIMER, 2000).

Já em SPD escarificado ocorre rompimento da camada superficial do solo, utilizando implementos de hastes denominados escarificadores. Este manejo possibilita a mobilização do solo, sem a inversão da leiva, mantendo-se, assim, parte dos resíduos vegetais na superfície, evitando-se, parcialmente, a erosão hídrica do solo. Este método é indicado para melhoria física do solo, contudo, este procedimento mecânico não elimina a necessidade do uso de programas de rotação de culturas. Contudo, esse sistema não apresenta benefícios duráveis ao longo dos anos e, além disso, o SPD com uso de rotação de culturas apresenta melhor qualidade física do solo em comparação ao SPD escarificado (FRANCHINI *et al.*, 2011).

Santos e Tom (2003), estudando sistemas de manejo do solo com menores intensidades de revolvimento, comprovaram o aumento de P disponível no solo nestes sistemas. Entre os manejos estudados, o SPD e o cultivo mínimo (sistema semelhante ao SPD escarificado) acumularam maiores teores de P nas camadas superficiais, em relação ao SPC. Após 20 anos de adoção de SPD, fase denominada manutenção, observou-se elevado acúmulo de palhada, aumento do fluxo de C e N, maior reciclagem de nutrientes e retenção de água, além de menor exigência de P (SÁ, 2004). Assim, esta menor exigência de P em SPD, pode ser crucial para a racionalização do uso de fertilizantes fosfatados, com benefícios socioeconômicos e ambientais (FRANCHINI *et al.*, 2011).

Neste sentido, o excesso de P transportado aos cursos d'água e águas superficiais pode originar condições favoráveis ao crescimento exagerado de algas, microrganismos e outras plantas aquáticas superiores, processo denominado de eutrofização. Este crescimento de algas causa aumento da demanda biológica de oxigênio (O_2), modificação do pH e liberação de toxinas que ocasionam turbidez da água e a morte de peixes e outros animais aquáticos (SHARPLEY *et al.*, 1992; SHARPLEY; HALVORSON, 1994; NOVAIS; SMYTH, 1999). Uma alternativa seria estabelecer o Nível Crítico Ambiental (NCA) para os extratores de P disponível, como o Mehlich-1, que indicaria o valor acima do qual seriam acarretados problemas ambientais causados pelo excesso de P, como exemplo a eutrofização (SHRAPLEY, 1995).

2.4 SUCESSÃO E ROTAÇÃO DE CULTURAS

A rotação de culturas é um dos requisitos para garantir a qualidade do SPD. A ausência desta prática provoca alterações físico-químicas e biológicas no solo que podem

comprometer a eficiência deste sistema. Esta prática define-se como a alternância ordenada de diferentes espécies vegetais, em determinado tempo, numa mesma área ou estação do ano. Em contrapartida, a sucessão de culturas é definida como ordenamento de duas culturas em uma mesma área agrícola, sendo cada espécie cultivada em uma estação do ano, como exemplo, soja cultivada no verão e trigo no inverno (FRANCHINI *et al.*, 2011).

As culturas adotadas em sistemas de rotação devem atender alguns princípios básicos como a produção considerável de massa da parte aérea e radicular, visando aumento dos teores da MOS, além da formação de cobertura do solo, sendo este componente essencial do SPD (FRANCHINI *et al.*, 2011).

Algumas espécies utilizadas no sistema de rotação proporcionam rendimento de grãos, sementes ou forragens, outras apresentam ótimo desenvolvimento radicular, profundo e agressivo, acarretando, assim, melhorias na qualidade do solo. Geralmente, as plantas adotadas neste sistema apresentam exigências nutricionais diferentes, como as leguminosas e gramíneas. O uso de um programa adequado de rotação de culturas contribui, satisfatoriamente, para o acréscimo da produtividade de grãos e na estabilidade da produção agrícola em condições de estresses bióticos e abióticos, além de auxiliar na racionalização do uso de insumos como fertilizantes minerais (FRANCHINI *et al.*, 2011).

A qualidade física do solo é um dos fatores primordiais que determinam a produtividade das culturas, sendo que a compactação é a principal causa da degradação desta qualidade. Em SPD, é frequente a formação de uma camada com maior grau de compactação na camada 0,10-0,20 m de profundidade, podendo restringir, consideravelmente, o desenvolvimento radicular das plantas cultivadas (FRANCHINI *et al.*, 2009). Vale ressaltar que um bom e rico sistema de rotação de culturas pode propiciar melhorias físicas do solo, com a manutenção do grau de compactação dentro de limites aceitáveis.

Além das melhorias na qualidade física do solo, o uso de rotação gera benefícios químicos, como o acréscimo dos teores da MOS. Isto influencia na estruturação do solo, no fornecimento de nutrientes às culturas, além de aumentar a CTC, biomassa microbiana, complexar elementos tóxicos às plantas como o alumínio, e disponibilizar nutrientes, como o P (FRANCHINI *et al.*, 2011).

O acréscimo dos teores de MOS e outros nutrientes, como o P, inicia-se em superfície e aprofunda-se com o tempo de uso da rotação, sendo que esta taxa de acúmulo é proporcional à quantidade de palhada adicionada em superfície. Além disso, esta taxa depende das culturas utilizadas nos sistemas de rotação, da qualidade da palhada, do grau de mobilização do solo, do tipo de solo, da temperatura e umidade e da fertilidade. Portanto, não

há um sistema padrão de rotação de culturas para o Brasil devido à grande diversidade climática, de solos e de sistemas de produção agrícola existentes. Contudo, em SPD, prevalece o uso de culturas de grãos, como soja, milho e trigo, para viabilidade econômica do sistema e, a utilização de plantas de coberturas, como aveia preta, tremoço e nabo forrageiro, para formação de cobertura vegetal (ANGHINONI, 2007).

Devido à baixa disponibilidade de P nos solos muito intemperizados, algumas plantas e organismos adotam algumas estratégias morfofisiológicas, como aumento da relação raiz x parte aérea, alongamento dos pelos radiculares e associações com fungos micorrízicos visando incremento na absorção de P (GATIBONI, 2003). As micorrizas arbusculares (associação benéfica entre fungos micorrízicos e as plantas) favorecem a absorção de P devido ao aumento da área de contato raiz x solo (CARNEIRO *et al.*, 2002). Por outro lado, as raízes proteoides, presentes em áreas com deficiência de P, permitem o aumento da superfície de contato, atuam sobre os transportadores de fósforo inorgânico (Pi) e influenciam a solubilização do P ligado à Fe, Ca e Al por meio da exsudação de ácidos orgânicos e outros compostos (mecanismos bioquímicos e fisiológicos) (ZONTA *et al.*, 2006). Além disso, plantas do gênero *Lupinus*, como exemplo a espécie *Lupinus albus*- muito utilizado em programas de rotação - são conhecidas pela capacidade de exsudação de ácido cítrico de suas raízes e, conseqüentemente, favorecem a solubilização, aumentando, assim, a disponibilidade de P em solos cultivados com tais espécies (EIRA, 1992).

A eficiência da utilização de P adicionado por fertilização química é maior em SPD consolidado (com 22 anos de adoção) com rotação de culturas do que em SPD em sucessão (FRANCHINI *et al.*, 2011). Portanto, a rotação de culturas em SPD é fundamental para a racionalização do uso de fertilizantes fosfatados que são considerados finitos. Contudo, devido à diversidade de sistemas de culturas e diferentes condições de solos e climas no Brasil, resultados concisos de experimentos de longa duração utilizando-se o SPD e sistemas de culturas são, ainda, escassos (ANGHINONI, 2007).

3. ARTIGO A

FÓSFORO DISPONÍVEL EM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO E DE CULTURAS AO LONGO DE 24 ANOS

3.1 RESUMO

O sistema de manejo do solo interfere na adsorção de fósforo (P) e a avaliação da disponibilidade deste nutriente é fundamental para a racionalização do uso de fertilizantes fosfatados. Este estudo objetivou avaliar os teores de P disponível no solo, ao longo de 24 anos, em diferentes sistemas de manejos e de culturas, em um Latossolo Vermelho Distroférico (LVd). O delineamento foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições em esquema fatorial 3x2, sendo constituído por três manejos do solo [sistema de plantio direto (PD), sistema de plantio direto escarificado (PDesc) e plantio convencional (PC)] e dois sistemas de culturas [sucessão (SUC) e rotação (ROT)]. Ao longo dos anos do experimento e em cada parcela, foram coletadas e analisadas amostras de solo das camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, sendo o P disponível determinado por Mehlich-1. Além disso, em 2013, determinaram-se os teores de carbono orgânico total (COT) e a capacidade de troca de cátions (CTC) e estimou-se a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e a energia de ligação pelas isothermas de Langmuir. As alterações dos teores de fósforo disponível ocorreram na camada 0,00-0,10 m. Nessa camada, a menor intensidade de revolvimento do solo no PD reduziu a CMAP, em função do aumento dos teores de COT e CTC do solo, aumentando-se, assim, os teores de P disponível para as plantas em relação ao PDesc e PC. Após os 24 anos, não foram observados os benefícios do uso de rotação de culturas (ROT) sobre a disponibilidade de fósforo para as plantas, independente do sistema de manejo adotado. Não ocorreu aumento significativo dos teores de P disponível quando o solo foi manejado com aração e gradagens.

Palavras-chave: Plantio direto, Plantio convencional, Rotação de culturas, Adsorção de fosfato, Energia de ligação de fosfato.

AVAILABLE PHOSPHORUS IN OXISOL IN DIFFERENT TILLAGE AND CROP SYSTEMS ALONG 24 YEARS

3.2 ABSTRACT

The soil management system interferes in phosphorus (P) adsorption and the assessment of the availability of this nutrient is essential for rational use of phosphate fertilizers. This paper aimed to evaluate the values of available phosphorus in the soil, over 24 years in different systems of management and cultures in an Oxisol in southern region of Brazil [CFA climate]. The design was a randomized block with four replications and factorial arrangement 3x2, three soil managements [no-till (NT), NT with chiseling (NTC) and conventional tillage (CT)] and two systems of cultures [crop succession (SUC) and crop rotation (ROT)]. In all the years of the experiment and in each plot, soil samples were collected at the 0-0.10 and 0.10-0.20 m and these were analyzed separately. Available P was determined, over the 24 years, by Mehlich-1. In samples collected in 2013 was determined the phosphorus adsorption maximum (PAM) and the adsorption energy by Langmuir isotherms, the total organic carbon (TOC) and the cation exchange capacity (CEC). Changes in available phosphorus occurred in the layer from 0.00 to 0.10 m. In this layer, the least amount of soil disturbance in PD reduced the CMAP, due to the increase of TOC and soil CEC, increasing levels of P available to plants in relation to PDesc and PC. After 24 years of management, we have not seen the benefits of crop rotation use (ROT) on phosphorus availability to plants, independent of soil management and no significant increase in available P levels was observed when the soil is plied with plowing and disking.

Key words: No-till. Conventional tillage. Crop rotation. Phosphate adsorption. Adsorption energy.

3.3 INTRODUÇÃO

A manutenção de teores adequados de fósforo (P) disponível no solo é imprescindível para garantir a produtividade das culturas, sendo este nutriente considerado um recurso finito e insubstituível para o desenvolvimento vegetal (MALAVOLTA, 1999). A busca por sistemas de manejo e de culturas mais eficientes na utilização do P é considerada um desafio para a comunidade científica, pressupondo-se que estes sistemas devem, pelo menos, repor as quantidades removidas deste nutriente do solo.

Solos muito intemperizados, como os Latossolos, apresentam considerável adsorção aniônica, principalmente de fosfatos, diminuindo, assim, a disponibilidade de P às plantas cultivadas. Em solos, cuja fração argila é composta em sua maioria por óxidos e hidróxidos de Fe e Al e caulinita, a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) é

muito alta, transformando esse elemento em frações menos e não-lábeis (NOVAIS; SMYTH, 1999; NOVAIS *et al.*, 2007).

O sistema de manejo do solo interfere na disponibilidade e no processo de adsorção de P. Em sistemas em que ocorre menor revolvimento do solo e manutenção de resíduos e uso de cobertura vegetal, como no plantio direto (PD), o processo de adsorção de P é reduzido, aumentando-se, assim, sua disponibilidade para as plantas (GATIBONI, 2003). Neste sistema, ácidos orgânicos de baixo peso molecular, resultantes dos processos de decomposição dos restos orgânicos, da exsudação radicular e da síntese microbiana, estabelecem complexos com o Fe e AL, além de serem adsorvidos às superfícies dos óxidos, bloqueando os sítios de adsorção de P (RHEINHEIMER, 2000). Por outro lado, em sistemas com intensa mobilização do solo, como no plantio convencional (PC), caracterizado por constantes operações de aração e gradagem, o P é retido com maior energia de ligação aos coloides inorgânicos, além de ocorrer exposição de novos sítios de adsorção.

Para a avaliação deste processo, utilizam-se isotermas que descrevem as relações de equilíbrio entre a quantidade de um elemento adsorvido, neste caso o P, e a quantidade remanescente deste na solução final. Dentre os modelos mais utilizados para a adsorção de P no solo, a isoterma de Langmuir destaca-se por possibilitar a estimativa da capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP) pelo solo. Por exemplo, um solo com CMAP de $1,0 \text{ mg g}^{-1}$, apresenta potencial de fixação de 23 Mg ha^{-1} de superfosfato simples (SFS), ou seja, aproximadamente $4,14 \text{ Mg}$ de P_2O_5 não estará disponível às plantas (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Assim, a avaliação da disponibilidade de P nos solos é fundamental para a racionalização do uso de fertilizantes fosfatados, tendo em vista que a evolução do uso destes fertilizantes no Brasil é crescente e a tendência é aumentar consideravelmente nos próximos anos (FRANCHINI *et al.*, 2011; MALAVOLTA, 1999). Além disso, resultados concisos de experimentos de longa duração utilizando-se o PD e sistemas de culturas são escassos, devido à grande diversidade de sistemas de culturas e às diferentes condições de solos e climas no Brasil (ANGHINONI, 2007).

Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar os teores disponíveis de P no solo, ao longo de 24 anos, em diferentes sistemas de manejos e de culturas.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Histórico da área experimental

A área experimental, ocupada inicialmente por Floresta Atlântica, começou a ser cultivada com café (*Coffea arabica* L.) em 1960. Em 1976, iniciaram-se os cultivos anuais de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e trigo (*Triticum aestivum* L.) sob PC, com aração seguida de gradagem. Entre 1987 e 1989 foram realizadas calagem, fertilização e descompactação para implantação deste experimento, cujos tratamentos serão descritos a seguir. O preparo do solo para a instalação das parcelas foi realizado por aração e gradagem niveladora (PICCININ, 2005; MORAES, 2013).

3.4.2 Caracterização e delineamento

O experimento de longa duração foi instalado em 1989, no campo experimental do Centro Nacional de Pesquisa de Soja (CNPSo), situado em Londrina-PR, a 23°11' de latitude Sul e 51°11' de longitude Oeste, altitude de 620 m e declividade média de 0,03 m m⁻¹. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é Cfa (subtropical úmido), com médias anuais de 21°C de temperatura e 1622 mm de precipitação. O solo da área é de origem basáltica e classificado como Latossolo Vermelho Distroférico (LVd), segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2013), que corresponde ao Rhodic Eutrudox no Sistema Americano de Classificação (SOIL SURVEY STAFF, 2010). Na camada 0,00-0,10 m, os teores de argila, silte e areia são 731, 195 e 72 g kg⁻¹, respectivamente, e, na camada 0,10-0,20 m de 757, 174 e 67 g kg⁻¹, e densidade de partícula de 2,90 g cm⁻³. Os atributos químicos das camadas 0,00 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m após 24 anos de experimento são apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Atributos químicos¹ das camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m, após 24 anos (Dezembro/2013).

| Camadas | Al ³⁺ | H+Al | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | ² CTC |
|-----------|------------------------------------|------|------------------|------------------|----------------|------------------|
| m | cmol _c dm ⁻³ | | | | | |
| 0,00-0,10 | 0,06 | 4,41 | 4,13 | 1,60 | 0,54 | 10,67 |
| 0,10-0,20 | 0,10 | 4,51 | 3,68 | 1,36 | 0,42 | 9,96 |

¹Valores médios dos tratamentos; ²CTC, capacidade de troca de cátions.

O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições, em esquema fatorial 3x2, sendo três formas de manejo do solo (Tabela 3.2) e dois sistemas de culturas (Tabela 3.3). As parcelas possuem 30 m de comprimento por 7.5 m de largura, totalizando 225 m².

Tabela 3.2 - Descrição dos manejos de solo.

| Sistema de manejo do solo | Descrição |
|---------------------------|---|
| PD | Sistema plantio direto (SPD) contínuo desde 1989. |
| PC | Sistema de plantio convencional utilizando-se arado de disco com profundidade média de 0,25m, seguida de uma gradagem niveladora. |
| PDesc | SPD escarificado, utilizando-se equipamento tipo cruzador a cada três anos (1992; 1995; 1998; 2001; 2004; 2007; 2010 e 2013), antes da implantação da cultura de inverno. |

A cada três anos realizou-se calagem, aplicando-se o corretivo em superfície, com aproximadamente 2 Mg ha⁻¹, para elevar a saturação por bases (V%) a 60% e aumentar o pH, determinado em água, para 5.5, em todos os tratamentos. Em cada safra, os tratamentos receberam as mesmas quantidades de fertilizantes, definidas com base em análises químicas de solo e recomendação da necessidade para cada cultura. Os formulados de N, P₂O₅ e K₂O foram depositados em sulco, concomitante a semeadura, a 0,05 m abaixo e ao lado das sementes. A aveia preta e o tremoço branco, espécies utilizadas no sistema de rotação, não receberam qualquer aporte de adubação mineral. As parcelas cultivadas com trigo, tremoço branco e aveia preta foram semeadas nos meses de abril, em todos os anos agrícolas, desde o início do experimento.

Tabela 3.3 - Sistemas de rotação (ROT) e sucessão (SUC) de culturas em função dos ciclos de cultivo.

| Sistemas | Ciclos de cultivo | | | | | | | |
|----------|--|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|--|-------|
| | 1989-1993-1997-2001-2005- 2009-2013 | | 1990-1994-1998- 2002-2006-2010 | | 1991-1995-1999- 2003-2007-2011 | | 1988-1992-1996- 2000-2004-2008-2012 | |
| | Inverno | Verão | Inverno | Verão | Inverno | Verão | Inverno | Verão |
| Rotação | Tremoço/Nabo ¹ | Milho | Aveia | Soja | Trigo | Soja | Trigo | Soja |
| Sucessão | Trigo | Soja | Trigo | Soja | Trigo | Soja | Trigo | Soja |

¹Em cada ciclo de cultivo utilizou-se apenas uma espécie (Tremoço: 1989, 1997, 2005 e 2013; Nabo: 1993, 2001 e 2009).

As cultivares de trigo, milho e soja utilizadas ao longo dos anos foram descritas em Franchini *et al.* (2012).

3.4.3 Coleta das amostras

Ao longo dos anos do experimento (1991, 1993, 1997, 1999, 2001, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2010, 2012 e 2013) foram coletadas, em cada parcela, amostras deformadas de solo nas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m. Estas coletas foram realizadas antes da implantação da safra de inverno (abril) e consideradas como representativas de cada ano. Entretanto, em 2013, a coleta foi realizada em dezembro. Após, foram secas ao ar e tamisadas em malha de 2,00 mm para realização das análises laboratoriais.

3.4.4 Análises laboratoriais

O P disponível foi determinado, ao longo dos anos deste experimento, pelo método Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$) (Mehlich, 1953). Nas amostras coletadas em dezembro/2013, determinaram-se também os teores de carbono orgânico total (COT) e a capacidade de troca de cátions (CTC) e estimou-se a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e a energia de ligação pelas isotermas de Langmuir.

Para a determinação da CMAP, o fósforo remanescente (P_{rem}) foi determinado, conforme Alvarez *et al.* (2000). Adicionando-se uma sequência de concentrações crescentes de P, utilizando-se KH_2PO_4 , (0; 20; 40; 80 e 120 mg de P L^{-1}), determinadas pelos valores de P_{rem} . As concentrações de P nas soluções em equilíbrio (sobrenadante) foram determinadas após 24h de agitação, como descrito em Novais e Kamprath (1979). A determinação dos teores P extraídos por Mehlich-1 (P_M), P_{rem} e de P na solução de equilíbrio foi realizada por colorimetria, de acordo com Murphy e Riley (1962), e, a leitura efetuada em espectrofotômetro em 720 nm. A diferença entre a concentração de P adicionada e em equilíbrio refere-se ao P adsorvido ao solo. Os valores de P sobrenadante e P adsorvido foram submetidos ao ajuste da isoterma de Langmuir, que após linearização foi utilizada para estimar a CMAP. A equação da isoterma de Langmuir, em sua forma hiperbólica, é dada por:

$$x/m = (abC)/(1 + aC)$$

Em que x/m é a quantidade de P adsorvido ao solo em mg de P/g de solo; b é a CMAP em mg g^{-1} de P no solo; C é a concentração de P na solução de equilíbrio em mg L^{-1} e a é uma constante relacionada com a energia de ligação do elemento ao solo em mg L^{-1} . Para estimativa das constantes a e b esta equação foi transformada em forma linear:

$$C/(x/m) = 1/(ab) + (1/b) C$$

A CMAP (b) foi determinada pelo valor inverso da declividade da reta e a constante de energia de ligação (a) pela relação entre a declividade da reta e a interseção da mesma com o eixo das ordenadas (Novais; Smyth, 1999).

3.4.5 Análises estatísticas

As médias dos teores de COT, pH, CTC e CMAP de 2013, nos diferentes sistemas de manejo e culturas, foram submetidas à análise de variância - Anova (Teste F, $p < 0,05$). Quando o efeito dos tratamentos foi significativo, em nível de 5% de probabilidade, as diferenças entre as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%.

Os teores de P_M ao longo dos 24 anos foram classificados em diferentes níveis de disponibilidade, a partir da observação de dendrogramas. Estes foram obtidos por análise de agrupamentos pelo método hierárquico (Ward). O algoritmo Ward agrega os valores de P_M para criar uma nova Classe com dispersão mínima. As médias e os intervalos de confiança de 95% foram calculados para os teores de P disponível nas Classes formadas ao longo dos 24 anos. As diferentes Classes de disponibilidade de P_M também foram submetidas à Anova (Teste F, $p < 0,05$) e ao teste de Tukey a 5%.

Considerando o efeito residual do COT, pH e CTC ao longo dos 24 anos de experimento, foram realizadas análises de regressões entre estes atributos e os teores de P_M , CMAP e energia de ligação com auxílio do programa Statistica V 5.0. As camadas (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m) foram analisadas separadamente.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Atributos químicos dos diferentes sistemas de manejo

Após 24 anos, a camada 0,00-0,10 m do PD-ROT e do PD-SUC apresentaram os maiores teores de carbono orgânico, com 19,99 e 19,70 g kg^{-1} , em relação ao PDesc-ROT e o PC-ROT e PC-SUC, cujos teores de COT foram menores que 15 g kg^{-1}

(Tabela 3.4). Os sistemas PD e PDesc com sucessão apresentaram a maior CTC dentre os sistemas de manejo e o PC com rotação e sucessão as menores.

Tabela 3.4 - Teores de carbono orgânico total (COT), pH e capacidade de troca de cátions (CTC) das camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m após 24 anos (coleta realizada em 2013) de plantio direto (PD), plantio direto escarificado (PDesc) e plantio convencional (PC) em rotação (ROT) e sucessão (SUC) de culturas.

| | COT, g kg ⁻¹ | pH | CTC, cmol _c dm ⁻³ |
|-------------|-------------------------|---------|---|
| 0,00-0,10 m | | | |
| PD-ROT | 19,70 ab ¹ | 5,33 ab | 11,21 abc |
| PD-SUC | 19,99 a | 5,51 a | 12,27 a |
| PDesc-ROT | 14,23 c | 5,02 ab | 10,45 bc |
| PDesc-SUC | 17,12 abc | 5,37 ab | 11,52 ab |
| PC-ROT | 14,62 bc | 4,80 b | 9,95 c |
| PC-SUC | 13,63 c | 5,03 ab | 9,86 c |
| 0,10-0,20 m | | | |
| PD-ROT | 11,44 a | 4,85 a | 9,74 a |
| PD-SUC | 10,88 a | 5,33 a | 9,98 a |
| PDesc-ROT | 11,02 a | 4,84 a | 9,58 a |
| PDesc-SUC | 11,18 a | 5,19 a | 9,97 a |
| PC-ROT | 12,49 a | 4,84 a | 9,92 a |
| PC-SUC | 13,08 a | 5,05 a | 10,09 a |

¹Letras diferentes minúsculas na coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey (5%).

O maior teor de COT e da CTC ocorreu nos sistemas de plantio direto, em relação ao plantio convencional, pois o não revolvimento do solo promoveu o acúmulo de C no solo, enquanto que a intensa mobilização do solo com aração e gradagem niveladora no PC causou a desestruturação do solo e a oxidação do carbono.

Não foi possível observar benefício do uso de rotação de culturas, independente do sistema de manejo. Possivelmente, o benefício da rotação de culturas foi suprimido pela maior fertilização no sistema de sucessão de culturas. Tendo em vista que a sucessão privilegia a produção de grãos nas safras de verão e inverno, e a fertilização é realizada duas vezes ao ano, enquanto que no sistema com rotação, somente a safra de verão recebe aporte de fertilizantes químicos. Dessa forma, a maior fertilização do sistema de sucessão estimula um maior desenvolvimento radicular das culturas utilizadas na sucessão em relação à rotação, igualando os teores de COT e CTC em ambos os sistemas de culturas.

As diferenças do teor de carbono orgânico e da CTC entre os diferentes manejos do solo foram encontrados somente, na camada 0,00-0,10 m (Tabela 3.4).

3.5.2 Classes de disponibilidade de P_M

Na camada 0,00-0,10 m, o PD apresentou três Classes de teores de P_M e o PDesc duas Classes (Figura 3.1). O PD e o PDesc, independente do sistema de culturas (ROT e SUC), apresentaram aumento significativo do teor de P_M no solo a partir de 2005, onde, os teores médios de 26,09 e 31,19 mg kg^{-1} , do período entre 1991 a 2005 (Classe I), atingiram, respectivamente, 53,23 e 50,82 mg kg^{-1} a partir de 2007 (Classe II) (Figura 3.1 e Tabela 3.6). O benefício do PD em relação ao PDesc pode ser observado a partir de 2013 (Classe III), cujo teor médio de P_M do PD aumentou de 53,23 para 72,99 mg kg^{-1} e no PDesc mantiveram-se constantes.

Diferente dos sistemas PD e PDesc, no PC foi possível observar duas Classes de disponibilidade de P_M , uma de 1991 a 2010 (Classe I) e a segunda de 2010 a 2013 (Classe II) (Figura 4.1). Apesar do aumento do teor médio de P_M na Classe II, observou-se que ao longo dos 24 anos, este acréscimo não foi significativo (Tabela 3.6).

As Classes I e II do PD e do PDesc estão relacionadas às fases inicial e de transição deste sistema (Sá, 2004). Segundo esse autor, a fase inicial (Classe I do presente estudo), apresenta os menores teores de P e COT e na fase de transição (Classe II do presente estudo) tem-se o início do acúmulo de resíduos na camada superficial e, conseqüentemente, aumento dos teores de P disponível, COT e da CTC.

A Classe III, que diferenciou o PD do PDesc e PC, representa a fase de estabilização do PD (Sá, 2004). Este autor verificou, entre 10 e 20 anos de adoção do PD, ocorrência de elevada reciclagem de nutrientes, maior acúmulo de palhada e aumento dos teores de COT, CTC e P disponível. Guimarães *et al.* (2008) demonstraram que em PD, o P acumulou-se na camada de 0.00-0.10, e que nesta camada o P disponível apresentou altos índices de correlações positivas com os teores de COT.

3.5.3 Capacidade máxima de adsorção de P

Os valores da CMAP oscilaram entre 0,66 e 0,92 mg g^{-1} , na camada 0,00-0,10, e de 0,82 a 0,95 mg g^{-1} na camada 0,10-0,20 m. Os menores valores foram encontrados na camada 0,00-0,10 m nos sistemas PDesc e PD, em SUC, com 0,66 e 0,72 mg g^{-1} , respectivamente. E, os maiores valores, foram encontrados na camada 0,10-0,20 m, nestes mesmos sistemas, com 0,92 e 0,95 mg g^{-1} , respectivamente (Tabela 3.5).

Na camada 0,00-0,10 m, a CMAP do PC não apresentou diferença significativa em relação ao PD, pois, a maior concentração de COT, assim como a atividade e

a diversidade microbiana do solo é maior nos primeiros 5 centímetros de profundidade, ou seja, a camada amostrada até 0,10 m, pode estar “diluindo” os efeitos da MOS no processo de adsorção de P neste estudo. Ressalte-se que, a energia de ligação, nos diferentes sistemas de manejo e de culturas, não apresentou correlação com a CMAP (r^2 : -0,43^{n.s}) e com o COT (r^2 : -0,42^{n.s}).

Tabela 3.5 – Capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) nos diferentes sistemas de manejo e de culturas nas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m.

| Sistemas | CMAP, mg g ⁻¹ | |
|------------|--------------------------|-------------------|
| | 0,00-0,10 m | 0,10-0,20 m |
| PD-ROT | 0,81a ¹ | 0,87 ^a |
| PC-ROT | 0,89a | 0,91 ^a |
| PDdesc-ROT | 0,89a | 0,87 ^a |
| PD-SUC | 0,72a | 0,95 ^a |
| PC-SUC | 0,92a | 0,82 ^a |
| PDdesc-SUC | 0,66a | 0,92 ^a |

¹Letras iguais e minúsculas na coluna não apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey (5%) para os sistemas de manejo e de culturas.

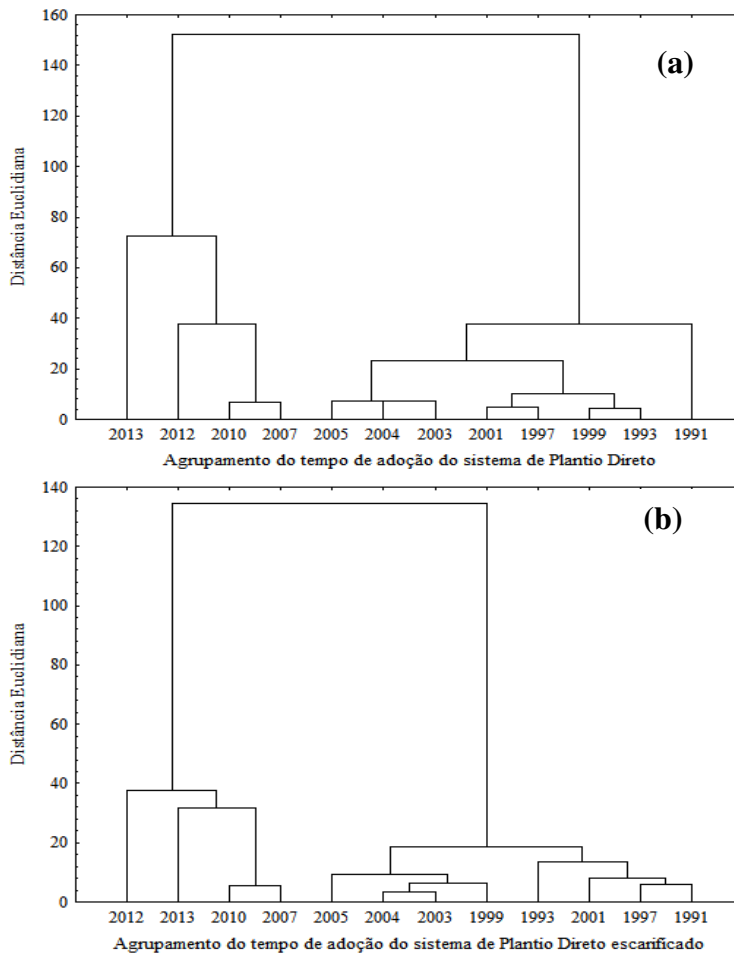
3.5.4 Teores de P_M nos diferentes sistemas de manejo do solo

Em relação ao sistema de manejo do solo (PD, PDdesc e PC), as principais diferenças de P_M ocorreram na camada superficial (0,00-0,10 m) e, embora a aplicação de P seja realizada em superfície, o PD-SUC apresentou aumento significativo no teor de P_M na camada 0,10-0,20 m, no período de maturação deste sistema (Classe III) (tabela 3.6). Nesta camada, os teores de P_M foram semelhantes entre PD-ROT, PDdesc-SUC, PDdesc-ROT, PC-SUC e PC-ROT ao longo dos anos.

As aplicações anuais de fertilizantes fosfatados, em sulco e concomitante à semeadura, promoveram acúmulo do P em superfície, provavelmente, em frações inorgânicas lábeis (Barrow, 1999; e Novais e Smith, 1999). Deve-se considerar ainda que o ortofosfato - H₂PO₄⁻, com baixo coeficiente de difusão (De) em água (aproximadamente 0,89 x 10⁻⁵ cm² seg⁻¹) e, no solo, apresenta coeficiente ainda menor (entre 1x10⁻⁵ e 5x10⁻¹¹ cm² seg⁻¹). Barber (1980) relatou que em quatro dias o P pode percorrer distâncias entre 0,083 e 0,0059 cm. Rhoton (2000), estudando sistemas de PD, também relatou maiores concentrações de P disponível na camada superficial do solo. E, Muzilli (1983), Sidiras; Pavan (1985) e Sá (1993), em solos da região dos Campos Gerais no Paraná, manejados sob PD com diferentes

tempos de adoção, observaram que o acúmulo de P disponível ocorreu principalmente nos primeiros 2,5 cm de solo.

O aumento do teor de P_M na camada 0,10-0,20 m no PD-SUC pode ser devido à decomposição da matéria orgânica estocada nessa camada. Em sistemas de plantio direto já estabilizados, o fósforo orgânico tem maior participação nos teores disponíveis desse elemento. Sá (1994) observou que em sistemas de plantio direto estabelecidos, a fração orgânica de P pode ser a principal fonte de troca de fosfato com a solução do solo.



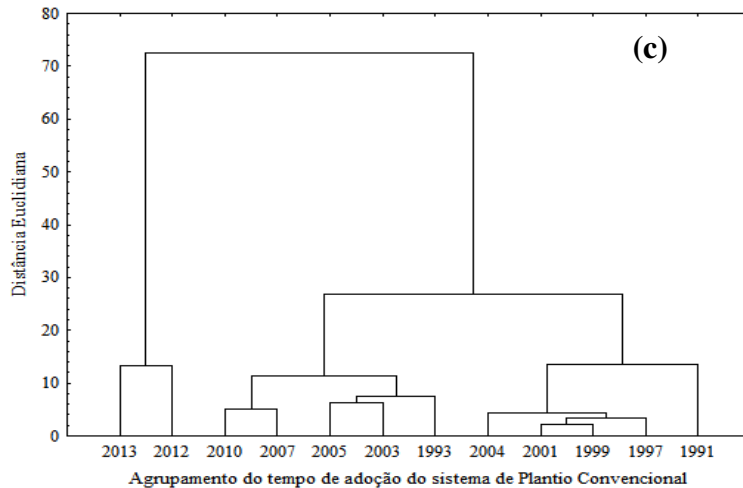


Figura 3.1 - Dendrogramas dos teores médios entre ROT e SUC de P_M , ao longo dos 24 anos do experimento, em PD (a), PDesc (b) e PC (c).

A partir de 2007, na camada 0-0,10 m do PD-ROT e SUC, foi observado um aumento significativo de P_M na Classe II (Tabela 3.6). Ressalte-se que houve uma redução do teor de P_M na Classe III do PD-ROT. No PDesc-SUC houve aumento do teor de P_M na Classe II, já no PDesc-ROT, PC-ROT e PC-SUC o teor de P_M não aumentou ao longo dos 24 anos de fertilização (Tabela 3.6).

Ainda na camada 0-0,10 m, a partir de 2013 (Classe III), período de estabilização do PD, no PD-SUC houve um aumento do teor de P_M , de 50,63 para 101,74 g kg^{-1} , enquanto que no PD-ROT, embora não significativamente em relação à Classe II, o teor de P_M reduziu-se em 21% (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Variação dos teores de P_M ao longo de 24 anos nas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m nos sistemas de plantio direto (PD), plantio direto escarificado (PDesc) e plantio convencional (PC) em rotação (ROT) e sucessão (SUC) de culturas.

| P_M , mg kg ⁻¹ | Tempo de adoção | | | Tempo de adoção | | |
|-----------------------------|-----------------------|------------|------------|-----------------|-----------|------------|
| | Classe I | Classe II | Classe III | Classe I | Classe II | Classe III |
| 0,00-0,10 m | | | | | | |
| PD-ROT | 26,74 bA ¹ | 55,83 aAB | 44,24 abB | 1991-2005 | 2007-2012 | 2013 |
| PD-SUC | 25,44 cA | 50,63 bABC | 101,74 aA | | | |
| PDesc-ROT | 29,95 aA | 38,14 aBC | | 1991-2005 | 2007-2013 | |
| PDesc-SUC | 32,44 bA | 63,51 aA | | | | |
| PC-ROT | 14,22 aA | 27,30 aD | | 1991-2010 | 2010-2013 | |
| PC-SUC | 15,16 aA | 32,64 aCD | | | | |
| 0,10-0,20 m | | | | | | |
| PD-ROT | 8,76 aA | 9,44 aBC | 14,71 a | | | |
| PD-SUC | 6,79 bA | 6,68 bC | 18,44 a | | | |
| PDesc-ROT | 9,39 aA | 15,07 aABC | | | | |
| PDesc-SUC | 9,04 aA | 18,37 aAB | | | | |
| PC-ROT | 11,90 bA | 23,01 aA | | | | |
| PC-SUC | 10,61 bA | 23,57 aA | | | | |

¹Letras diferentes, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, indicam diferença significativa pelo teste de Tukey (5%) para as Classes e para os sistemas de manejo, respectivamente.

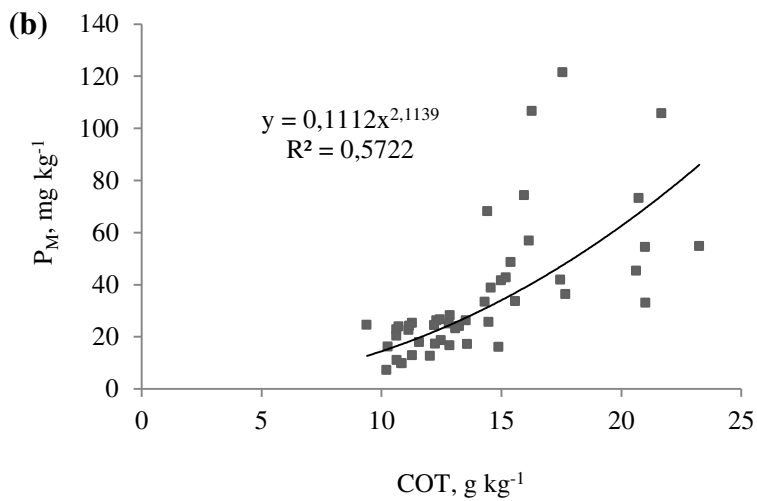
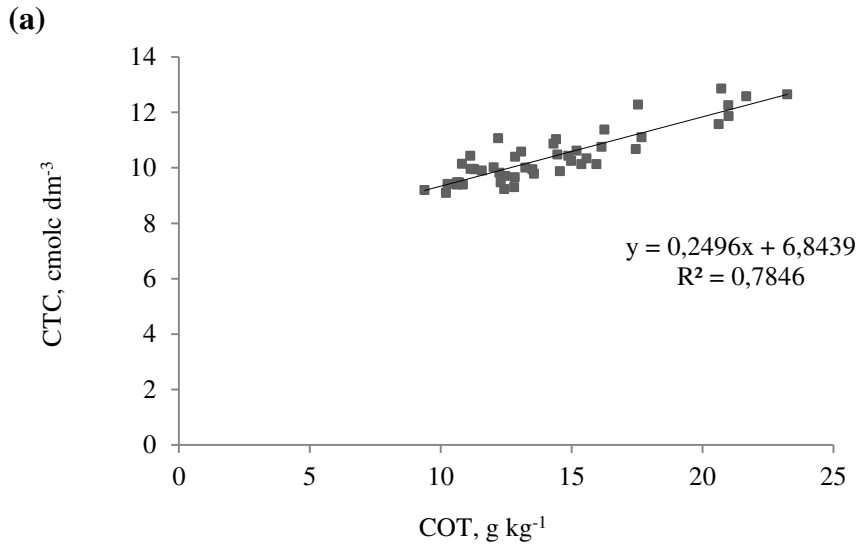
No PD-ROT, PD-SUC e PDesc-SUC, o aumento na disponibilidade de P ao longo dos anos, pode ser explicado pela fertilização fosfatada anual. Araújo *et al.* (1993) observaram que a adubação do solo por 25 anos, ocasionou acréscimo dos teores de P orgânico e inorgânico, quando comparado ao solo de mata nativa.

No PC não houve aumento significativo dos teores médios de P_M ao longo do tempo, devido à intensa mobilização do solo que promove maior contato entre os íons fosfato e a superfície do coloide inorgânico, favorecendo as reações de adsorção reduzindo a disponibilidade deste íon às plantas, principalmente em solos com predominância de minerais do tipo 1:1 (como a caulinita) e óxidos de ferro e alumínio. Nesses coloides, a formação de cargas negativas é dependente do pH, e, em condições de acidez (pH 5,1) ocorre predominância de cargas positivas, conseqüentemente, aumento da afinidade entre o P e as superfícies destes minerais (SÁ, 2004).

A maior disponibilidade de P_M ao longo dos anos no PD em relação ao PDesc e, principalmente, em relação ao PC, pode ser explicada pela influência do carbono orgânico na CTC e pela diminuição da energia de ligação do P no solo.

Na camada 0,00-0,10 m o COT apresentou correlação significativa linear com a CTC e exponencial com os teores de P_M (Figura 3.2 a, b), e ainda, a disponibilidade de

P apresentou correlação linear negativa e significativa com a energia de ligação no PD e no PC, sendo essa correlação potencial (Figura 3.2 c). Ou seja, no PD quanto menor a energia de ligação, maior a disponibilidade de P neste sistema. E, no PC, um acréscimo mínimo nos valores dessa energia gerou uma considerável redução nos teores de P disponível.



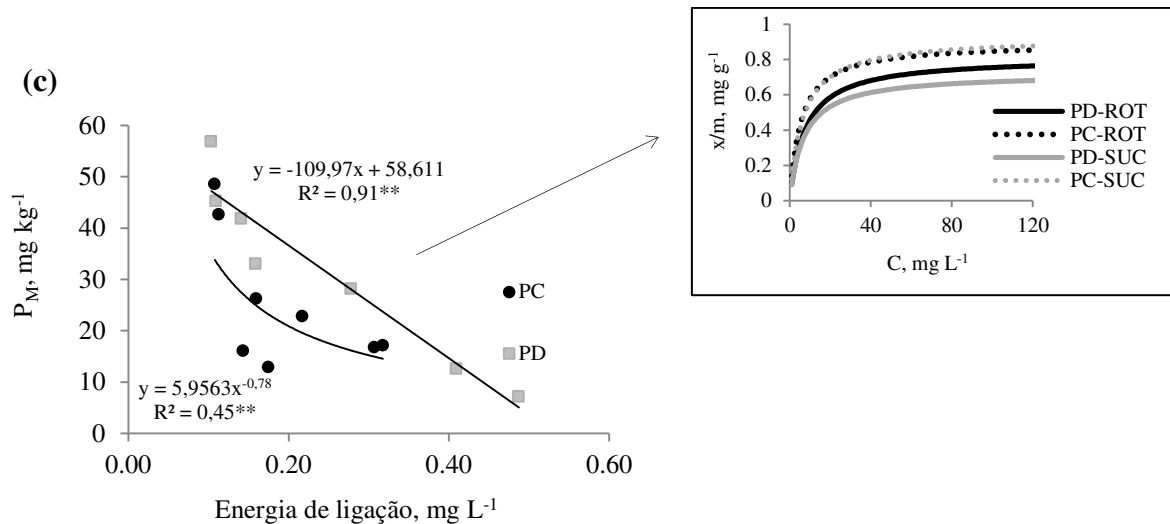


Figura 3.2 - Correlação entre a capacidade de troca de cátions (CTC) e os teores de carbono orgânico total (COT) (a); dos teores de P_M com os valores de COT (b); e, da energia de ligação de P com os teores de P_M do solo, a figura superior à direita apresenta as isotermas de adsorção de P no PC e PD em SUC e ROT(c) na camada 0,00-0,10 m das amostras de Latossolo Vermelho utilizado neste estudo.

O aumento do COT, com a adoção do PD, aumentou a CTC e os teores de P_M do solo ao longo dos 24 anos neste sistema de manejo (Tabelas 3.4 e 3.5). Mendonça e Rowell (1996) determinaram que o COT é 121 vezes mais importante que a fração argila como responsável pela CTC. E a CTC pode ser aumentada ainda mais em sistemas de manejo que incrementem os teores de COT, como o PD (CIOTTA *et al.*, 2003; BAYER, 1996).

O aumento exponencial da disponibilidade de P_M com o aumento do COT pode ser explicado pelo aumento da taxa de mineralização de P e C, além do bloqueio dos sítios de adsorção dos minerais. Erich *et al.* (2002) observaram um incremento das taxas de mineralização de P com o material orgânico adicionado. O aumento do COT aumenta a disponibilidade de P_M através do bloqueio dos sítios de adsorção, deslocando o P adsorvido pela fração mineral do solo para a solução (GUPPY *et al.*, 2005; ANDRADE *et al.*, 2003). Dessa forma, a rápida taxa de mineralização do material orgânico adicionado pode diminuir os efeitos da adsorção de P em solos muito intemperizados (NZIGUHEBA *et al.*, 1998).

No PD, os ácidos orgânicos de baixo peso molecular, resultantes dos processos de decomposição dos resíduos orgânicos, da exsudação radicular e da síntese microbiana, estabelecem complexos com o Fe e Al, além de serem adsorvidos às superfícies dos óxidos, bloqueando os sítios de adsorção de P (RHEINHEIMER, 2000). Assim, sistemas de manejo que aumentem o aporte de COT, como o PD, podem reduzir linearmente a energia de ligação e incrementar a reciclagem de P no solo. No PC, com a mobilização do solo, a

matéria orgânica deixa de bloquear os sítios específicos de adsorção, ocorrendo redução na formação dos complexos organominerais entre o carbono e os óxidos de ferro e alumínio. Assim, a intensa mobilização do solo explica porque houve um aumento potencial da energia de ligação de P com a redução do COT e porque o PC não apresentou aumento da disponibilidade de P_M ao longo dos 24 anos de manejo.

3.6 CONCLUSÕES

Ao longo do tempo, o menor revolvimento do solo promoveu aumento dos teores de COT e da CTC, reduzindo a energia de ligação e aumentando os teores de P disponível para as plantas em relação aos sistemas PDesc e PC.

A escarificação periódica do solo, utilizada no sistema plantio direto escarificado (PDesc), reduziu a disponibilidade de P disponível e em relação ao plantio direto contínuo (PD).

No plantio convencional (PC) não houve aumento significativo dos teores de P_M ao longo dos 24 anos de manejo na primeira camada amostrada.

Não foram observados benefícios do uso de rotação de culturas (ROT) sobre a disponibilidade de fósforo para as plantas, independente do sistema de manejo adotado.

4. ARTIGO B

BALANÇO DA EXPORTAÇÃO DE FÓSFORO EM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO E DE CULTURAS AO LONGO DE 24 ANOS NO SUL DO BRASIL

4.1 RESUMO

Os balanços negativos entre a aplicação de fertilizantes fosfatados e a remoção deste nutriente pelos grãos, reduzem sistematicamente, o potencial de produtividade das culturas. Portanto, a avaliação da eficiência de exportação de P é fundamental para a racionalização do uso de fertilizantes fosfatados, resultando em benefícios ambientais e econômicos. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar a exportação de P em diferentes sistemas de manejo e de culturas, ao longo de 24 anos, em um Latossolo Vermelho Distroférico (LVd), na região sul do Brasil [clima Cfa (subtropical úmido)]. O delineamento foi de blocos ao acaso, com quatro repetições em esquema fatorial 3x2, sendo constituído por três manejos do solo [sistema de plantio direto (PD), sistema de plantio direto escarificado (PDesc) e plantio convencional (PC)] e dois sistemas de culturas [sucessão (SUC) e rotação (ROT)]. A maior influência sobre a extração de P pelas plantas foi ocasionada pelo sistema de manejo de culturas, com maior eficiência de exportação quando se utiliza a rotação de culturas. Dessa forma, o sistema de plantio direto aliado à rotação de culturas tem potencial para racionalizar o uso de fertilizantes fosfatados. A cultura do milho apresentou as maiores exportações de P, seguidas pelas culturas da soja e do trigo. A escarificação periódica do solo no sistema plantio direto (PDesc), neste experimento, não apresentou qualquer vantagem para exportação de P em relação ao PD contínuo.

Palavras-chave: Plantio direto. Plantio convencional. Rotação de culturas. Sucessão de Culturas.

EXTRACTION EFFICIENCY OF PHOSPHORUS IN DIFFERENT TILLAGE AND CROP SYSTEMS ALONG 24 YEARS IN SOUTHERN BRAZIL

4.2 ABSTRACT

The negative balance between the application of phosphate fertilizers and the removal of this nutrient by grain, reduce systematically the potential of crop yield. Therefore, the evaluation of P extraction efficiency is fundamental to rationalize the use of phosphate fertilizers, resulting in environmental and economic benefits. In this sense, the objective of this paper was to evaluate the efficiency of P extraction in different management systems and cultures, over 24 years in a Rhodic Eutrudox, in southern Brazil [CFA climate]. The design was a randomized block with four replications in factorial arrangement 3x2, consisting of three soil managements [no-till (NT), no till with chiseling (NTC) and conventional tillage (PC)] and two crops systems [succession (SUC) and rotation (ROT)]. The no-tillage system combined with crop rotation has the potential to rationalize the use of phosphate fertilizers. The corn had the highest P extraction efficiencies, followed by soybean and wheat. Over time, the extraction efficiency of P for soybean equaled that of corn in no-tillage (NT). The break in the crop rotation system reduced the efficiency of P extraction in 2013 (Class III). Periodic soil chiseling in no-till (NTC) in this experiment did not prove any advantage for the extraction of P on continuous PD.

Keywords: No-till. Conventional tillage. Crop rotation. Succession crops.

4.3 INTRODUÇÃO

O balanço negativo entre a aplicação de fertilizantes fosfatados e a remoção deste nutriente pelos grãos, reduz sistematicamente o potencial de produtividade das culturas (YAMADA, 2004). Esta redução ocorre, pois, o fósforo (P), é considerado elemento imprescindível nos processos de fotossíntese, respiração, transferência de genes e reprodução. Por este motivo, manter as culturas com níveis adequados deste nutriente é crucial para a obtenção de ótimas produtividades, além de garantir a qualidade de frutos e grãos. Assim, a avaliação da exportação de P é fundamental para a racionalização do uso de fertilizantes fosfatados, resultando em benefícios ambientais e econômicos (FRANCHINI *et al.*, 2011).

Dentre os fertilizantes minerais, os fosfatados são os mais utilizados em solos tropicais para nutrição de plantas cultivadas (RAIJ, 1991). Pois, a maioria dos solos agricultáveis no Brasil, possuem níveis insatisfatórios de P disponível às plantas, como os do Cerrado, que apresentam cerca de 2 mg kg⁻¹ de P extraído por Mehlich-1 em 92% das amostras analisadas (LOPES; COX, 1977). Contudo, as reservas de rochas sedimentares fosfáticas estão se esgotando, e em contrapartida, a demanda do uso dos fertilizantes

fosfatados no Brasil é crescente e a tendência é de aumento considerável nos próximos anos (FIXEN, 2009; MALAVOLTA, 1999).

Os sistemas de manejo interferem no comportamento e na labilidade do P no solo. Algumas práticas adotadas, como o não revolvimento do solo e a manutenção dos resíduos vegetais no sistema de plantio direto (PD), podem, por exemplo, reduzir o processo de adsorção específica de íons fosfato, acarretando aumento da eficiência da fertilização fosfatada (GATIBONI, 2003).

O sistema plantio direto é considerado uma alternativa importante para a sustentabilidade dos agroecossistemas brasileiros (MUZILLI, 2000; 2002). Neste sistema, ocorre acúmulo de P em superfície, devido à forma de aplicação, a sua liberação pela decomposição dos resíduos vegetais e a menor adsorção deste elemento nas partículas minerais do solo (SIDRAS, PAVAN, 1985). Além disso, a rotação de culturas, considerada como um dos requisitos básicos deste sistema pode influenciar a eficiência de exportação de P pela decomposição das raízes e dos resíduos vegetais, tornando possível a redução da aplicação de fertilizantes fosfatados (FRANCHINI *et al.*, 2011). Em contrapartida, em sistemas de plantio convencional (PC), caracterizados por constantes operações de revolvimento do solo, como aração e gradagem, a maior intensidade do processo de adsorção reduz a disponibilidade de P às plantas.

Diante do exposto, são necessários estudos visando aumento da eficiência do uso do P pelas plantas cultivadas, buscando sistemas de produção mais sustentáveis no aproveitamento deste nutriente (FIXEN, 2009; ASHLEY; CORDELL; MAVINIC, 2011). Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar o balanço da exportação de P em um Latossolo Vermelho muito argiloso, sob diferentes sistemas de manejo e de culturas, ao longo de 24 anos.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Histórico da área experimental

A área experimental, ocupada inicialmente por Floresta Atlântica, começou a ser cultivada com café (*Coffea arabica* L.) em 1960. Em 1976, iniciaram-se os cultivos anuais de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e trigo (*Triticum aestivum* L.) sob PC, com aração seguida de gradagem. Entre 1987 e 1989 foram realizadas calagem, fertilização e descompactação para implantação deste experimento, cujos tratamentos serão descritos a

seguir. O preparo do solo para a instalação das parcelas foi realizado por aração e gradagem niveladora (PICCININ, 2005; MORAES, 2013).

4.4.2 Caracterização e delineamento experimental

O experimento de longa duração foi instalado em 1989, no campo experimental do Centro Nacional de Pesquisa de Soja (CNPSO- Embrapa Soja), situado em Londrina-PR, a 23°11' de latitude Sul e 51°11' de longitude Oeste, altitude de 620 m e declividade média de 0,03 m m⁻¹. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é Cfa (subtropical úmido), com médias anuais de 21°C de temperatura e 1622 mm de precipitação. O solo da área é de origem basáltica e classificado como Latossolo Vermelho Distroférico (LVd), segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2013), que corresponde ao Rhodic Eutrudox no Sistema Americano de Classificação (SOIL SURVEY STAFF, 2010). Na camada 0,00-0,10 m, os teores de argila, silte e areia são 731, 195 e 72 g kg⁻¹, respectivamente, e, na camada 0,10-0,20 m de 757, 174 e 67 g kg⁻¹, e densidade de partícula de 2,90 g cm⁻³. Os atributos químicos para caracterização do Latossolo Vermelho utilizado neste estudo foram apresentados na Tabela 3.1 (Artigo A).

O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições, em esquema fatorial 3x2, sendo três formas de manejo do solo (Tabela 4.1) e dois sistemas de culturas (Tabela 4.2). As parcelas possuem 30 m de comprimento por 7,5 m de largura, totalizando 225 m². Os dados de precipitação média anual, ao longo dos anos do experimento, foram recolhidos pela estação meteorológica do CNPSO, situada em Londrina-PR, a 23°11' de latitude Sul e 51°11' de longitude Oeste, altitude de 620 m.

Tabela 4.1 - Descrição dos manejos de solo realizados nos tratamentos.

| Sistema de manejo do solo | Descrição |
|---------------------------|---|
| PD | Sistema plantio direto (SPD) contínuo desde 1989. |
| PC | Sistema de plantio convencional utilizando-se arado de disco com profundidade média de 0,25m, seguida de gradagem niveladora. |
| PDesc | SPD escarificado, utilizando-se equipamento tipo cruzador, a cada três anos (1992; 1995; 1998; 2001; 2004; 2007; 2010 e 2013) antes da implantação da cultura de inverno. |

Tabela 4.2 - Sistemas de rotação (ROT) e sucessão (SUC) de culturas em função dos ciclos de cultivo.

| Sistemas | Ciclos de cultivo | | | | | | | |
|----------|--|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|--|-------|
| | 1989-1993-1997-2001-2005- 2009-2013 | | 1990-1994-1998- 2002-2006-2010 | | 1991-1995-1999- 2003-2007-2011 | | 1988-1992-1996-2000- 2004-2008-2012 | |
| | Inverno | Verão | Inverno | Verão | Inverno | Verão | Inverno | Verão |
| Rotação | Tremoço/Nabo | Milho | Aveia | Soja | Trigo | Soja | Trigo | Soja |
| Sucessão | Trigo | Soja | Trigo | Soja | Trigo | Soja | Trigo | Soja |

¹Em cada ciclo de cultivo utilizou-se apenas uma espécie (Tremoço: 1989, 1997, 2005 e 2013; Nabo: 1993, 2001 e 2009).

A cada três anos realizou-se calagem aplicada em superfície, com aproximadamente 2 t ha⁻¹, para elevar a saturação por bases (V%) a 60% e aumentar o pH, determinado em água, para 5.5, em todos os tratamentos. Em cada safra, os tratamentos receberam as mesmas quantidades de fertilizantes, definidas com base em análises químicas de solo e recomendação da necessidade para cada cultura. Os formulados de N, P₂O₅ e K₂O foram depositados em sulco, concomitante a semeadura, a 0,05 m abaixo e ao lado das sementes. A aveia preta e o tremoço branco, espécies utilizadas no sistema de rotação, não receberam qualquer aporte de adubação mineral. As parcelas cultivadas com trigo, tremoço branco e aveia preta foram semeadas nos meses de abril, em todos os anos agrícolas, desde o início do experimento.

As cultivares de trigo, milho e soja utilizadas ao longo dos anos foram descritas em Franchini *et al.* (2012).

Tabela 4.3 - Fertilização utilizada para soja, trigo e milho ao longo de 24 anos.

| Cultura | Fertilização ¹ | | |
|---------------------|---------------------------|--|---|
| | N (kg ha ⁻¹) | P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) | K ₂ O (kg ha ⁻¹) |
| Soja ^{b,c} | 0,0 | 34,0-60,0 | 22,5-60,0 |
| Trigo | 12,8-20,0 | 45,0-70,0 | 24,0-40,5 |
| Milho | 8,5-30,0 | 28,0-75,0 | 34,0-60,0 |

¹ N, P₂O₅ e K₂O foram aplicados na forma de ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio. ^bAs sementes de soja foram inoculadas com *Bradyrhizobium melkanii* e *B. japonicum* em todas as safras. ^c Após a 10^a safra, 20 g ha⁻¹ de molibdênio (molibdato de sódio) e 2 g ha⁻¹ de cobalto (cloreto de cobalto) foram utilizadas no tratamento de sementes da soja.

4.4.3 Cálculo da eficiência relativa de uso do P pelas culturas nos diferentes sistemas

Conhecendo-se as quantidades anuais de P₂O₅ aplicadas, a produção de cada cultura e as quantidades exportadas deste nutriente nos grãos, calculou-se o balanço entre

aplicação e extração deste nutriente pelas plantas nos diferentes sistemas de manejo do solo (Tabela 4.1) e de culturas (Tabela 4.2). A exportação de cada cultura, em porcentagem, foi calculada por meio da relação entre o P_2O_5 exportado com os grãos e a quantidade aplicada deste (FRANCHINI *et al.*, 2011). Para estes cálculos, utilizaram-se os bancos de dados da Embrapa Soja de produtividade das culturas, teores de P nos grãos e quantidade de P_2O_5 aplicada, ao longo dos 24 anos do experimento. De acordo com as determinações dos teores de P nos grãos, adotaram-se valores médios de 10, 7,3 e 6,88 kg de P_2O_5 por 1000 kg de grãos, para soja, trigo e milho, respectivamente.

4.4.6 Análises estatísticas

Analisou-se a média, CV, valor mínimo e máximo de exportação média de fósforo nos diferentes sistemas de manejo do solo e de culturas. Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando constatadas diferenças entre as médias, estas foram comparadas utilizando-se teste de Tukey ($p < 0,05$). A análise de variância e testes de médias (quando necessários) foi realizada considerando os sistemas de manejo do solo e de culturas, agrupando-se as diferentes culturas para o mesmo sistema de manejo. As exportações de P para as diferentes culturas não foram comparadas entre si. Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa Statistica V5. 0.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Estatística descritiva

Os coeficientes de variação (CV) da extração média de P nos diferentes sistemas foram inferiores a 40 %, indicando, a baixa variabilidade dos dados (WARRICK e NIELSEN, 1980) (Tabela 4.4).

De acordo com a tabela 4.4, constatou-se que o milho, adotado somente em ROT, apresentou as maiores exportações de P, com médias acima de 110 %. O trigo apresentou os menores valores, com médias inferiores a 35%. E, a soja, médias intermediárias, entre 42 e 74%.

Tabela 4.4- Eficiências médias de exportação de P no plantio direto (PD), direto escarificado (PDesc) e convencional (PC), em sucessão (SUC) e rotação (ROT) de culturas.

| Sistemas | n | Médias | Mínimo | Máximo | CV (%) |
|-----------------|----|----------------------|--------|--------|--------|
| PD-ROT- milho | 6 | 110,8 ($\pm 17,9$) | 61,6 | 185,8 | 39 |
| PDesc-ROT-milho | 6 | 115,2 ($\pm 12,8$) | 73,3 | 169,5 | 27 |
| PC-ROT- milho | 6 | 129,3 ($\pm 18,2$) | 80,4 | 188,4 | 34 |
| PD-ROT- soja | 17 | 72,3($\pm 3,8$) | 47,5 | 95,9 | 22 |
| PDesc-ROT-soja | 17 | 73,2 ($\pm 4,3$) | 47,3 | 111,6 | 24 |
| PC-ROT-soja | 17 | 42,3 ($\pm 4,3$) | 18,2 | 69,2 | 39 |
| PD-SUC-soja | 24 | 67.92 (± 3.07) | 42.3 | 100.1 | 22 |
| PDesc-SUC-soja | 24 | 65.27 (± 3.41) | 34.5 | 98.8 | 25 |
| PC-SUC-soja | 24 | 51.02 (± 2.94) | 22.3 | 71.5 | 27 |
| PD-ROT-trigo | 9 | 33.21 (± 3.03) | 13.5 | 42.6 | 27 |
| PDesc-ROT-trigo | 9 | 34.22 (± 3.25) | 13.7 | 42.8 | 28 |
| PC-ROT-trigo | 9 | 31.67 (± 3.56) | 12.5 | 42.5 | 33 |
| PD-SUC-trigo | 18 | 29.34 (± 2.74) | 13.3 | 45.2 | 33 |
| PDesc-SUC-trigo | 18 | 31.94 (± 2.42) | 12.2 | 48.6 | 32 |
| PC-SUC-trigo | 18 | 31.74 (± 2.68) | 11.8 | 49.9 | 35 |

4.5.2 Balanço da extração de P, ao longo dos anos, nos diferentes sistemas de manejo e culturas.

Na tabela 4.5 foram apresentados os resultados da eficiência de exportação de fósforo considerando os diferentes sistemas de manejo do solo e de culturas. Observou-se que a eficiência de exportação de fósforo do solo foi mais influenciada pela pelo sistema de cultura que o sistema de manejo do solo. A extração de P foi maior nos sistemas com rotação de culturas, sobretudo no PDesc ROT, em relação aos sistemas de sucessão (PC SUC, PD SUC e PDesc SUC). Não foi possível observar o benefício do uso do PD em relação aos sistemas com maior revolvimento do solo (PC e PDesc). A maior exportação de fósforo pelo uso de rotação de culturas foi confirmada quando comparado com o sistema que utilizou sucessão de culturas (tabela 4.5).

Tabela 4.5 - Exportação média de P nos sistemas de sucessão (SUC) e rotação (ROT) de culturas em plantio direto (PD), direto escarificado (PDesc) e convencional (PC).

| Sistemas de Manejos e Culturas | Cultura | Culturas | Sistema de Manejo (%) | Sistemas de Cultura | |
|--------------------------------|---------|----------|-----------------------|---------------------|--------|
| PC SUC | Soja | 56,3 | 44,4 b | 48,4 b | |
| | Trigo | 31,2 | | | |
| PD SUC | Soja | 68,4 | 50,9 b | | |
| | Trigo | 30,5 | | | |
| PDesc SUC | Soja | 66,9 | 49,9 b | | |
| | Trigo | 31,1 | | | |
| PC ROT | Soja | 56,1 | 61,4 ab | | |
| | Trigo | 31,7 | | | |
| | Milho | 131 | | | |
| PD ROT | Soja | 72,0 | 68,1 ab | | 67,2 a |
| | Trigo | 33,2 | | | |
| | Milho | 111 | | | |
| PDesc ROT | Soja | 73,7 | 71,8 a | | |
| | Trigo | 34,2 | | | |
| | Milho | 115 | | | |

As maiores exportações de P nos sistemas de ROT podem ser explicadas pelo maior aporte de carbono. O acúmulo de carbono na rotação de culturas, sobretudo quando associado aos sistemas com menor intensidade de revolvimento do solo, estimula a atividade biológica e aumenta a produção de ácidos orgânicos decorrentes da mineralização dos resíduos em superfície. A maior concentração e persistência desses ácidos orgânicos, como oxalato, citrato, malato e acetato, aumenta a solubilidade de P pela complexação dos óxidos de Fe e Al e pela competição por sítios de adsorção de P (SPOSITO, 1989; JONES, 1998; RYAN, 2001, GATIBONI, 2003). Estes ácidos, com maior número de grupos de OH⁻ e COOH⁻, são mais efetivos na competição pelos sítios de adsorção quando comparados aos de menor número. Além disso, as plantas utilizadas neste estudo em sistema de ROT, como o tremoço branco (*Lupinus albus* L.), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) e soja, destacam-se pela boa capacidade em exsudar ácido cítrico através de suas raízes (EIRA, 1992; PAVINATO *et al.* 2008).

O período entre 2005 e 2012 apresentou os menores valores de precipitação média anual (Figura 4.1). Este fato, associado ao incremento e alteração da qualidade do carbono, pode explicar a redução significativa da eficiência de extração de P nos sistemas com sucessão de culturas, pois sistemas caracterizados pelo menor revolvimento e manutenção da cobertura, aumentam, consideravelmente, a retenção de água no solo (PEIRETTI, 2014). Este fato pode ter favorecido a difusão de P (BARBER, 1980), e, conseqüentemente, a maior exportação deste nutriente pelas plantas.

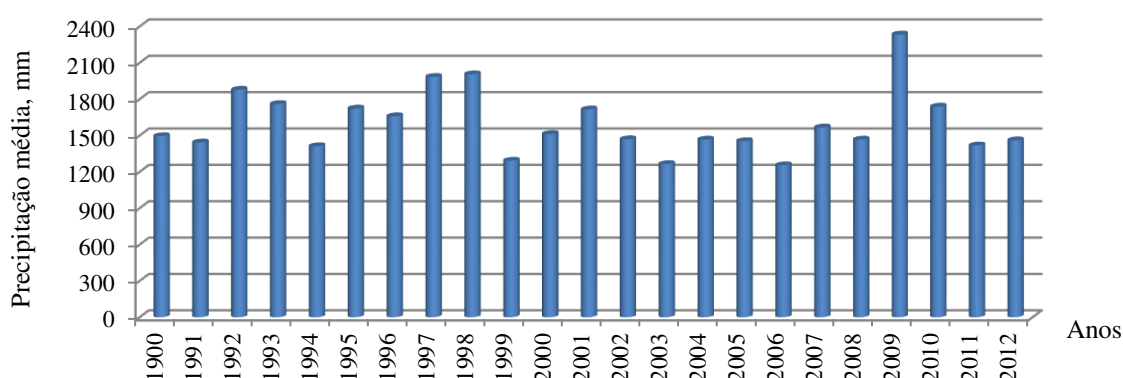


Figura 4.1- Precipitação média anual ao longo dos 24 anos do experimento.

Dentre as culturas, o milho foi a que apresentou as maiores exportações médias de P em relação à soja e ao trigo, com 129,3 no PC, 124,5 no PDesc e 121,8% no PD. Esta elevada exportação foi devido aos maiores rendimentos da cultura, em relação à soja e ao trigo, considerando-se que, a quantidade de P extraída nos grãos de milho, é de aproximadamente, 80 a 90 % do total de P absorvido (ANDRADE *et al.*, 1975; HIROCE *et al.*, 1989). Além disso, o milho tem apresentado boas respostas às adubações fosfatadas no Brasil (MODEL e ANGHINONI, 1992; CANTARELLA, 1993; FREIRE *et al.*, 1998; ERNANI *et al.*, 2000; PRADO *et al.*, 2001).

A maior exportação de P no milho pode ainda ser explicada pelas associações entre certos fungos e as raízes desta planta, denominadas de hifas micorrízicas, que aumentam a capacidade de assimilação de P no solo. Essas hifas transportam íons fosfato para o interior de suas células e os mecanismos de adsorção não conseguem interferir na dinâmica deste íon. Estas hifas prevalecem em solos com baixa disponibilidade de P, entretanto, os fungos podem beneficiar-se mesmo em solos com alta disponibilidade, como o deste estudo (Tabela 3.1), caso este for mantido com cobertura vegetal de plantas hospedeiras destes fungos, como o milho (BRADY, WEIL, 2013; BITTMAN, 2006).

A cultura da soja apresenta alto potencial de aproveitamento de fertilização fosfatada residual, quando a disponibilidade de P no solo está acima dos níveis críticos (LANTMANN *et al.*, 1996). E, de acordo com os resultados de P extraído por Mehlich-1, neste experimento (Tabela 3.1), o teor de P disponível encontra-se alto nas amostras de solo. Portanto, sistemas caracterizados por menor intensidade de revolvimento do solo aumentam as exportações de P pelas plantas cultivadas.

Em contrapartida, o trigo apresentou as menores exportações de P quando comparado com o milho e a soja (Tabelas 4.4 e 4.5), devido ao baixo aproveitamento da fertilização fosfatada por esta cultura, entre 15 e 20% (HALVORSON *et al.*, (1987). Além disso, Franchini *et al.* (2012), estudando a produtividade das culturas neste mesmo experimento, constataram que, ao longo dos anos, o trigo apresentou os menores rendimentos de grãos em relação à soja e ao milho, o que explica a menor exportação de P.

Dessa forma, observou-se a influência das culturas utilizadas na rotação, uma vez que a utilização da soja e, principalmente, do milho, explicam a maior eficiência de exportação de P do sistema de rotação de culturas em relação ao sistema com sucessão.

A rotação de culturas tem sido recomendada como uma prática efetiva nos incrementos da qualidade do solo e da produtividade das culturas na região sul do Brasil. No mesmo experimento de longa duração utilizado neste estudo, Franchini *et al.* (2012) relataram incrementos na produtividade da soja em ROT em relação à SUC que pode estar associado também ao aumento da eficiência de extração de P, observado neste estudo. Assim, pode-se inferir que o sistema de plantio direto aliado à rotação de culturas tem potencial para racionalizar o uso de fertilizantes fosfatados, resultando em benefícios econômicos e ambientais. Além disso, a escarificação periódica do solo em PD, neste experimento, não apresentou qualquer vantagem para extração de P em relação ao PD contínuo.

4.6 CONCLUSÕES

A maior influência sobre a extração de P pelas plantas foi ocasionada pelo sistema de manejo de culturas, com maior eficiência de exportação quando se utiliza a rotação de culturas.

Não foi possível observar o efeito do sistema de manejo do solo sobre a eficiência de extração de P pelas plantas. Contudo, o sistema de plantio direto aliado à rotação de culturas tem potencial para racionalização do uso de fertilizantes fosfatados.

A cultura do milho apresentou as maiores exportações de P, seguidas pelas culturas da soja e do trigo.

A escarificação periódica do solo no sistema plantio direto (PDesc), neste experimento, não apresentou qualquer vantagem para o balanço da exportação de P em relação ao PD contínuo.

5. CONCLUSÕES GERAIS

O menor revolvimento do solo reduziu a energia de ligação e aumentou os teores de P disponível ao longo do tempo em relação aos sistemas com maior revolvimento de solo, como a escarificação ou plantio convencional.

Apesar do aumento dos teores disponíveis, o plantio direto não aumentou a eficiência de exportação de P pelas plantas em relação aos outros sistemas de manejo do solo. Nesse sentido, mesmo não proporcionando aumento na disponibilidade, a maior influência sobre a extração de P pelas plantas foi ocasionada pelo sistema de manejo de culturas. As maiores eficiências de exportação foram encontradas no sistema de rotação de culturas.

Dentre os sistemas de manejo do solo, a escarificação periódica do solo utilizada no sistema de plantio direto, reduziu a disponibilidade de P disponível e, em relação ao plantio direto contínuo (PD) e o plantio convencional (PC). Além disso, não apresentou qualquer vantagem para o balanço da exportação de P em relação ao PD contínuo.

O sistema de plantio direto (PD) aliado à rotação de culturas (ROT) tem potencial para racionalização do uso de fertilizantes fosfatados.

6. ANEXO

MATERIAL E MÉTODOS

6.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O trabalho foi realizado em um experimento de longa duração, conduzido desde 1989 (Figura 6.1), no campo experimental do Centro Nacional de Pesquisa de Soja (CNPSo- Embrapa Soja), situado em Londrina-PR. O município está localizado no norte do Estado do Paraná, 23°11' de latitude Sul e 51°11' de longitude Oeste, a uma altitude de 620 m. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é Cfa (subtropical úmido), com médias anuais de 21°C de temperatura e 1622 mm e precipitação. O solo da área é de origem basáltica, muito argiloso e classificado como Latossolo Vermelho Distroférico (LVd), segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (SANTOS *et al.*, 2013), e, no Sistema Americano, como Rhodic Eutrudox (SOIL SURVEY STAFF, 2010).

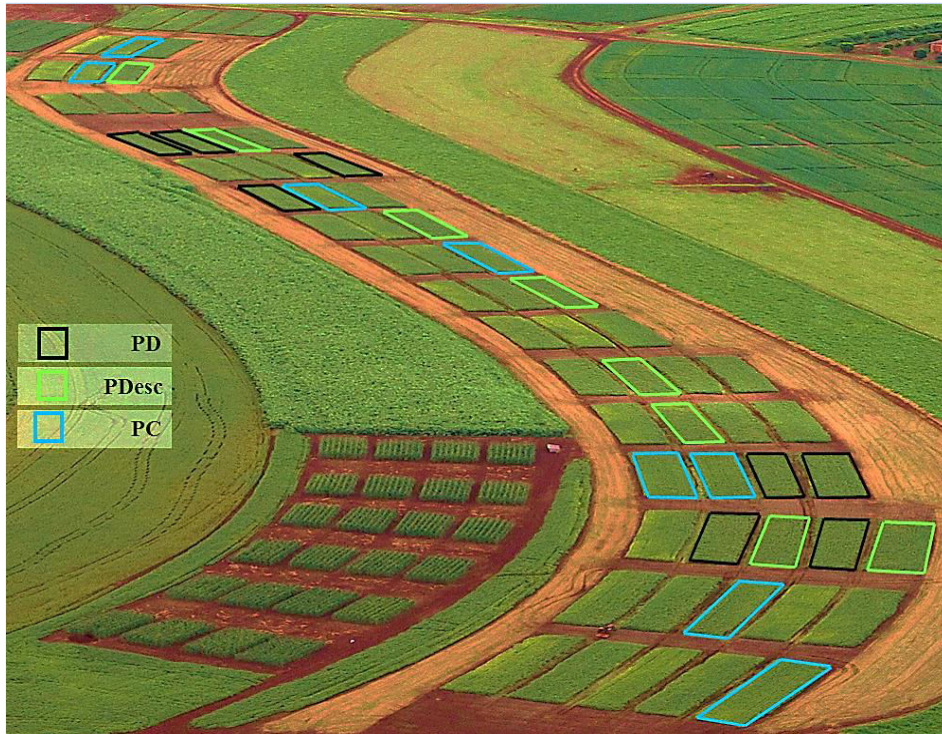


Figura 1 - Fotografia aérea do experimento de longa duração utilizado no estudo, cedida pelo pesquisador Dr. Julio Cezar Franchini. PD: Sistema de plantio direto. PDesc: Sistema de plantio direto escarificado. PC: Plantio convencional com arado de disco e grade niveladora.

6.2 HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O CNPSo está localizado na Fazenda Santa Terezinha desde 1987. A vegetação natural, classificada como Floresta Atlântica, foi retirada em 1960 para o cultivo de café (*Coffea arabica* L.). Em 1976, iniciaram-se os cultivos anuais de soja (*Glycine Max* (L.) Merrill) e trigo (*Triticum aestivum* L.), sob preparo convencional do solo (aração seguida de gradagem). Entre 1987 e 1989, implantou-se o experimento em questão, nominado como “Ensaio Novo”. Para correção dos atributos químicos do solo ao longo dos anos, foram realizadas calagens e fertilizações. Na instalação das unidades experimentais, o preparo do solo foi realizado com aração e gradagem niveladora (PICCININ, 2005; MORAES, 2013).

6.3 TRATAMENTOS

O delineamento utilizado neste estudo foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições em esquema fatorial 3x2, sendo três sistemas de manejo do solo (Tabela 6.1) e dois sistemas de culturas (Tabela 6.2). As unidades experimentais possuem 30 m de comprimento e 7.5 m de largura.

Tabela 1 - Descrição dos manejos de solo realizados nos tratamentos.

| Sistema de manejo do solo | Descrição |
|---------------------------|--|
| PD | Sistema plantio direto (SPD) contínuo desde 1989. |
| PC | Sistema de plantio convencional utilizando-se arado de disco até a profundidade média de 0,25m, seguida de gradagem niveladora. |
| PDesc | PD escarificado, utilizando-se equipamento tipo cruzador a cada três anos (1992; 1995; 1998; 2001; 2004; 2007; 2010 e 2013), antes da implantação da cultura de inverno. |

Tabela 2 - Sistemas de rotação e sucessão de culturas em função dos ciclos de cultivo.

| Sistemas | Ciclos de cultivo | | | | | | | |
|----------|--|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|--|-------|
| | 1989-1993-1997-2001- 2005-2009-2013 | | 1990-1994-1998- 2002-2006-2010 | | 1991-1995-1999- 2003-2007-2011 | | 1988-1992-1996-2000- 2004-2008-2012 | |
| | Inverno | Verão | Inverno | Verão | Inverno | Verão | Inverno | Verão |
| Rotação | Tremoço/ Nabo ¹ | Milho | Aveia | Soja | Trigo | Soja | Trigo | Soja |
| Sucessão | Trigo | Soja | Trigo | Soja | Trigo | Soja | Trigo | Soja |

¹ Em cada ciclo de cultivo utilizou-se apenas uma espécie (Tremoço: 1989, 1997, 2005 e 2013; Nabo: 1993, 2001 e 2009).

6.4 IMPLANTAÇÃO E MANEJO DAS CULTURAS

Três meses antes da implantação do experimento e a cada três anos, foram aplicadas, em média, 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico em superfície três meses antes da semeadura das culturas, atingindo 60% de saturação por bases (V%) e pH, determinado em água, de 5,5. Em cada safra, os tratamentos receberam as mesmas quantidades de fertilizantes, definidas com base nas análises químicas de solo e recomendações das necessidades nutricionais de cada cultura. Os formulados de N, P₂O₅ e K₂O foram aplicados no sulco, concomitantemente a semeadura, a 0,05 m abaixo e ao lado das sementes. Para a cultura da soja não houve aplicação de N, portanto as sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium elkanii* e *Bradyrhizobium japonicum*. Para o trigo e milho não se utilizou fontes nitrogenadas em cobertura. A aveia preta e o tremoço branco, espécies utilizadas no sistema de rotação, não receberam nenhum aporte mineral.

As unidades experimentais cultivadas com trigo, tremoço branco e aveia preta foram semeadas nos meses de abril em todos os anos agrícolas, desde o início do experimento (1989). O controle de plantas daninhas, pragas e doenças seguiram as recomendações técnicas indicadas para as culturas, não havendo diferenças entre os tratamentos. No PD realizaram-se dessecações com glifosato, 720 g ia ha⁻¹, e óleo mineral, 0,5 L ha⁻¹, antes do plantio das culturas.

As cultivares de trigo semeadas foram: BR 23 (1989-1994), BRS 18 (1995, 1997-2000), Ocepar 16 (1996), BRS 193 (2001 e 2002) e BRS 208 (2003-2010-2011), BRS Tangará (2012) e Pardela (2013). Os híbridos de milho utilizados foram: P 3230 (1990/1991 e 1993/1994), BRS 3123 (1997/1998), P 3041 (2001/2002), P 30F33 (2005/2006) e BRS 1030 (2009/2010), AG 9010 (2011), AG 9010 YG (2012) e DKB 350 YG (2013). Já as cultivares de soja foram: Paraná (em 1988/1989-1993/1994), BR 37 (1994/1995-1996/1997 e

1998/1999), Embrapa 48 (1997/1998 e 1999/2000), BRS 133 (2000/2001 e 2001/2002), BRS 156 (2002/2003 e 2003/2004), BRS 184 (2004/2005, 2008/2009 e 2009/2010), BRS 232 (2005/2006-2007/2008), BRS 316 RR (2011), BRS 360 RR (2012/2013).

6.5 COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO

Em cada unidade experimental foram coletadas amostras deformadas de solo, em duas camadas (0,00-0,10; 0,10-0,20 m), realizando-se trincheiras (0,30 x 0,30 x 0,30 m), evitando-se, assim, possível contaminação (Figura 6.2). Os instrumentos utilizados foram: pá reta, espátula, bandeja e pincel para limpeza adequada destes equipamentos. As amostras foram coletadas em capacidade de campo, homogeneizadas, acondicionadas em sacos plásticos limpos e identificadas para o envio ao laboratório de análises de solo da Embrapa Soja. Então foram secas ao ar e tamisadas em malha de 2 mm (TSFA) e de 0,5 mm, retirando-se os fragmentos vegetais e de raízes, evitando-se, assim, interferência nos resultados. Essas amostras foram utilizadas para realização das análises químicas, de granulometria (após secagem em estufa a 60°C) e para determinação da densidade de partículas.

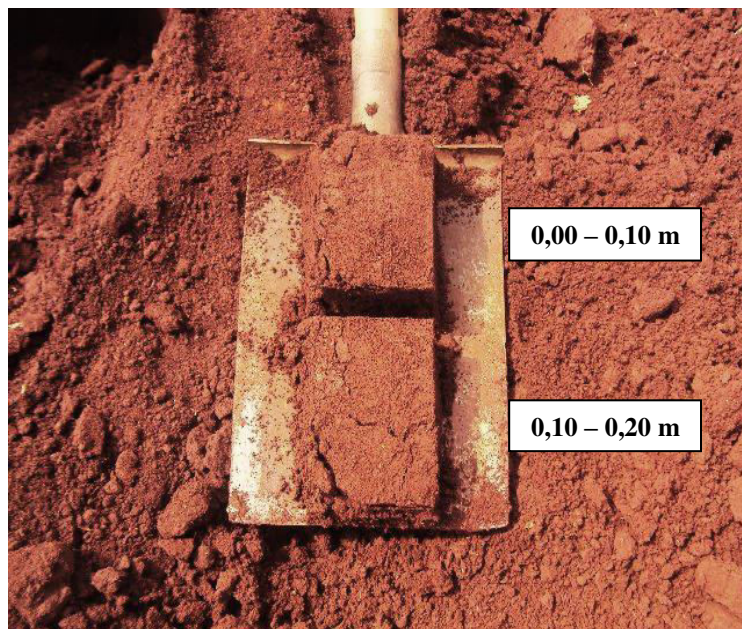


Figura 2 - Coleta das amostras deformadas de solo em duas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m.

6.6 ANÁLISES LABORATORIAIS

6.6.1 Granulometria

Para a determinação da granulometria das amostras de solo foi utilizado o método da pipeta, proposto por Claessen (1997). O princípio deste método é a lei de Stokes, que determina o tempo de sedimentação das partículas que compõem o solo (areia, silte e argila). Utilizou-se 20 g de terra fina seca em estufa - TFSE (60 °C), 100 mL de água deionizada e 10 mL de solução normal de hidróxido de sódio (NaOH- a 6%) em uma proveta. Agitou-se por 15 minutos, deixando-se em repouso por uma noite. A agitação mecânica foi realizada em agitador horizontal com velocidade de oscilação de 120 rpm, durante 1 hora. Completou-se o volume da suspensão com água deionizada em proveta de capacidade de 1000 mL, e após agitação de 20 segundos com bastão (este deve conter, em sua extremidade inferior, uma tampa de borracha com diversos orifícios e de diâmetro pouco menor que a proveta), pipetou-se 10 mL da suspensão a uma profundidade de 10 cm para determinação das frações argila + silte. Após período de 4 horas (tempo de sedimentação estipulado devido à padronização da temperatura em 20°C), pipetou-se 10 mL da suspensão a uma profundidade de 5 cm para determinação da fração argila. As suspensões pipetadas em béqueres (com capacidade de 50 mL e de peso conhecido) foram levadas a estufa para completa evaporação. Os béqueres contendo argila + silte e somente argila, após resfriamento em dessecador, foram pesados em balança com aproximação de 0,05 g. O cálculo utilizado para determinação do teor de argila foi determinado por uma sequência de diluições, ou seja, primeiramente, determinou-se o valor de solo presente na pipeta transformado em porcentagem:

$$\frac{20 \text{ g de TFSE}}{1000 \text{ mL}} = 0,02 \text{ g/mL}$$

$$0,02 \text{ g mL (proveta)} \times 10 \text{ mL (pipetado)} = 0,2 \text{ g TFSE presente na pipeta}$$

$$0,2 \text{ g TFSE} \text{ ----- } x \text{ g (argila + NaOH)}$$

$$100 \text{ g de TFSE} \text{ ----- } y \% \text{ (argila + NaOH)}$$

$$y \% = \frac{x \text{ g (argila+NaOH)} \times 100 \text{ g de TFSE}}{0,2\text{gTFSE}}$$

$$y \% = x \text{ g (argila + NaOH)} \times 500$$

Além deste cálculo, considerou-se a presença do NaOH (40 g L⁻¹):

$$\frac{40 \text{ g de NaOH}}{1000 \text{ mL}} = 0,04\text{g/mL}$$

$$0,04 \text{ g mL}^{-1} \times 10 \text{ mL (utilizados na dispersão)} = 0,4 \text{ g mL}^{-1}$$

$$\frac{0,4 \text{ g/mL}}{1000 \text{ mL}} = 0,0004\text{g/mL}$$

$$0,0004 \text{ g mL}^{-1} \times 10 \text{ mL (pipetados)} = 0,004 \text{ g de NaOH na pipeta com a argila}$$

$$0,2 \text{ g TFSE} \text{ ----- } 100 \%$$

$$0,004 \text{ g de NaOH} \text{----- } x \%$$

$$x = 2 \%$$
 de NaOH na pipeta

Unindo as equações, determinou-se o teor de argila em 10 mL pipetados:

$$\text{Argila \% ou g kg}^{-1} = (500 \times \text{argila} + \text{NaOH}) - 2 \%$$
 NaOH

A fração silte foi determinada por subtração (pipetou-se argila+silte e após 4h pipetou-se somente argila). A fração areia foi calculada pela seguinte equação:

$$\text{Areia g kg}^{-1} = 1000 \text{ g kg}^{-1} - (\text{argila g kg}^{-1} + \text{silte g kg}^{-1})$$

6.6.2 Densidade de Partículas

Utilizou-se a metodologia do balão volumétrico modificado (GUBIANI; REINERT; REICHERT, 2006), determinando-se o volume de álcool necessário para completar a capacidade de um balão volumétrico. A densidade de partículas foi quantificada por meio da equação:

$$D_p = \frac{(M_{bs} - M_b)}{\left[\frac{50 - (M_{bsa} - M_{bs})}{D_a} \right]}$$

Onde, D_p = densidade de partículas do solo (Mg m^{-3}); M_b = massa do balão volumétrico (g); M_{bs} = massa do balão volumétrico contendo o solo (g); M_{bsa} = massa do balão volumétrico contendo solo mais álcool (g); V_a = volume de álcool gasto para completar o volume do balão contendo o solo (ml); e D_a = densidade do álcool (g cm^{-3}).

6.6.3 Teores Totais de Carbono Orgânico e Nitrogênio

Os teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) foram determinados no analisador elementar Flash 2000 da fabricante Thermo Scientific®. O princípio é a combustão catalisada de, aproximadamente, 50 mg de amostras de solo

tamisadas em malha de 0,5 mm e acondicionadas em cápsulas de estanho. O carbono orgânico e o nitrogênio, em alta temperatura (900°C), transformam-se em gases (respectivamente CO₂ e N₂) e são assim determinados por detector sensível de condutividade térmica (DCT). Os dados obtidos são transferidos para um computador acoplado ao equipamento e são gerados dois picos de leitura, um para cada elemento. A concentração desses elementos na amostra é calculada pela área destes picos de condutividade. Utilizaram-se amostras-controle, com teores conhecidos de COT e NT, para verificação da confiabilidade dos dados obtidos.

6.6.4 Determinação de Alumínio (Al³⁺) Trocável no Solo

A análise do alumínio está baseada na reação de hidrólise dos íons Al³⁺ com a liberação de íons H⁺ na solução. O uso de NaOH representa, assim, uma reação de neutralização destes íons. Para esta análise, utilizou-se método descrito em Claessen (1997).

Extração: i) Pesou-se 5g de TFSA em recipientes plásticos;

ii) Adicionou-se 50 mL da solução de KCl 1 mol L⁻¹;

iii) Agitou-se em mesa de movimentos circulares por 10 minutos a 200 rpm;

iv) Deixou-se em repouso por 16 horas.

Determinação: i) Retirou-se 25 mL do sobrenadante;

ii) Adicionou-se 5 gotas do indicador vermelho de fenol;

iii) Agitou-se e a titulação foi realizada com solução de NaOH 0,015 mol L⁻¹, obtendo-se uma coloração verde clara.

6.6.5 Determinação de Cálcio (Ca²⁺) e Magnésio (Mg²⁺) Trocáveis no Solo

Utilizou-se o método da extração por KCl, descrito em Claessen (1997).

Extração: Procedimento idêntico ao da determinação de Al³⁺.



Figura 3 – Espectrofotômetro de absorção atômica da fabricante Perkin Elmer[®], modelo PinAAcle 900F.

- Determinação: i) Retirou-se alíquota de 0,2 mL do sobrenadante;
ii) Adicionou-se 9,8 mL da solução de Lantânio a 0,1%;
iii) Preparou-se a curva de calibração (para isto as soluções devem estar em temperatura ambiente, portanto, foram retiradas do refrigerador um dia antes da determinação);
iv) Procedeu-se a leitura em espectrofotômetro de absorção atômica (Figura 6.3).

6.6.6 Determinação de Potássio Trocável (K^+) no Solo

Este procedimento seguiu metodologia proposta em Claessen (1997) para quantificação de K no solo pelo método da extração Mehlich-1, também denominado de solução duplo-ácida ou Carolina do Norte, a partir de HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ e H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$.

- Extração: i) Pesou-se 5g de TFSA;
ii) Adicionou-se 50 mL da solução extratora de Mehlich-1 (1:10);
iii) Agitou-se em mesa de movimentos circulares durante 10 minutos a 200 rpm;
iv) Deixou-se em repouso por 16 horas para decantação.

Determinação: Retirou-se uma alíquota de 8 mL do sobrenadante das amostras em tubos de ensaio e procedeu-se leitura em fotômetro de chama.

6.6.7 Determinação do pH em $CaCl_2$ e índice SMP

Este método baseia-se na medida da concentração dos íons H^+ no solo. A solução designada SMP (Shoemaker, Mclean&Pratt) consiste na mistura de sais com vários

tampões, obtendo-se decréscimo linear no pH quando titulada potenciométricamente com ácido forte. O índice SMP apresenta alta correlação com os valores de H+Al (acidez potencial nos solos), que é utilizado em alguns estados como um dos critérios para a recomendação de calagem. Esta determinação seguiu a metodologia proposta em Claessen (1997).

Determinação do pH por Cloreto de Cálcio: i) Pesou-se 8g de TFSA das amostras em tubos plásticos;

ii) Adicionou-se 20 mL da solução de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0,01 \text{ mol L}^{-1}$;

iii) Agitou-se em mesa de movimentos circulares durante 40 minutos a 180 rpm;

iv) Após 30 minutos de repouso, realizou-se a leitura em potenciômetro.

Determinação do pH por solução SMP: i) Retoma-se a suspensão em que se determinou o pH em $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0,01 \text{ mol L}^{-1}$;

ii) Adicionou-se 4 mL da solução SMP;

iii) Agitou-se em mesa de movimentos circulares durante 40 minutos a 180 rpm e deixou-se em repouso por 16h;

iv) Após este período, agitou-se novamente durante 25 minutos a 180 rpm e depois de 30 minutos de repouso, procedeu-se a leitura em potenciômetro.

6.6.8 Determinações de P

6.6.8.1 Extração e determinação de P disponível por Mehlich-1

Para esta análise utilizou-se metodologia descrita em Claessen (1997).

Extração: Idem ao procedimento utilizado para K.

A determinação foi realizada de acordo com Murphy e Riley (1962):

i) Retirou-se uma alíquota de 5 mL do sobrenadante das amostras;

ii) Preparou-se a curva de calibração, em temperatura ambiente de 20°C , pipetando-se 5 mL das seguintes concentrações de P: 0,0; 0,07; 0,15; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0 e 10,0 mg L^{-1} ;

iii) Adicionou-se 10 mL da solução diluída de Molibdato de Amônio às amostras e à curva de calibração;

iv) Aguardou-se 30 minutos para formação e estabilização da cor azul;

v) Efetuou-se leitura em espectrofotômetro (Figura 6.4) em 720 nm.



Figura 4 - Espectrofotômetro de Absorção Molecular UV Vis. da fabricante Perkin Elmer[®], Modelo Lambda 25, equipado com auto-sampler.

6.6.8.2 Extração e determinação de P total

O processo de extração com H_2SO_4 concentrado (18 mol L^{-1}) permitiu a avaliação do P total, por digestão completa, utilizando-se superaquecimento das amostras em bloco digestor a 350°C . Este processo visa à queima de qualquer material orgânico que possa causar interferência nas leituras de P. Este método foi adaptado de Hedley *et al.* (1982), utilizando-se 0,2 g de TFSA e mistura catalisadora composta por CuSO_4 e K_2SO_4 (1:10) para acelerar a extração.

Extração: i) Pesou-se 0,2g de TFSA tamisada em malha de 0,5mm e acondicionada em tubos de vidro;

ii) Adicionou-se 1g da mistura catalisadora;

iii) Adicionou-se 1 mL de H_2SO_4 concentrado;

iv) Realizou-se o aquecimento em bloco digestor atingindo-se temperatura de 350°C até completar a digestão total das amostras;

v) Após a digestão, acrescentou-se 30 mL de água deionizada.

Determinação: Idem ao processo descrito para Mehlich-1.

6.6.8.3 Determinação de P remanescente

O fósforo remanescente (P_{rem}) é a concentração de P na solução de equilíbrio após agitar durante 1 hora a TFSA com solução de $CaCl_2$ 10 mmol L^{-1} contendo 60 mg L^{-1} de P na relação 1:10, como proposto em Alvarez *et al.*, 2000.

Extração do P_{rem} : i) Pesou-se 2g de solo em tubos plásticos;

ii) Adicionou-se 20 mL da solução de $CaCl_2$ 10 mmol L^{-1} contendo 60 mg L^{-1} de P;

iii) Agitou-se na mesa agitadora durante 5 minutos em 180 rpm;

iv) Deixou-se em repouso por 16 horas.

Determinação: Adicionou-se também à curva de calibração 60 mg L^{-1} de P, e as outras etapas deste processo foram idênticas às outras determinações de P.

6.6.8.4 Determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP)

Quantificou-se a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) nas amostras de TFSA. A adsorção de P no solo é lenta e dependente do tempo de contato. Para a mensuração desta capacidade, adicionou-se uma sequência de concentrações crescentes de P (0; 20; 40; 80 e 120mg de P L^{-1}) determinadas pelos valores de P_{rem} . Agitou-se por 24 horas, como descrito em Novais e Kamprath (1979), e, após, determinou-se as concentrações de P nas soluções em equilíbrio (sobrenadante). A diferença entre a concentração de P adicionada e em equilíbrio refere-se ao P adsorvido ao solo. Os valores de P sobrenadante e P adsorvido foram submetidos ao ajuste das isotermas de Langmuir, que permite alcançar a CMAP e a energia de ligação.

6.6.8.5 Determinação da eficiência relativa de uso do P pelas culturas nos diferentes sistemas

Estimou-se a quantidade de P exportado pelas culturas da soja, milho e trigo para o cálculo da eficiência do uso desse nutriente em sistemas de sucessão e rotação de culturas (FRANCHINI *et al.*, 2011). Para estes cálculos, utilizaram-se os bancos de dados de produtividade e de aplicação dos formulados fosfatados do CNPSo ao longo dos 24 anos deste experimento. Pois, conhecendo-se a quantidade de P aplicada via fertilização por ano, a produção de cada cultura e a quantidade exportada de P nos grãos, calculou-se a eficiência do uso deste nutriente pelas plantas e nos diferentes sistemas de manejos e de culturas (rotação e sucessão).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (Boletim Informativo), Viçosa, v.25, p.27-33, 2000.
- AMER, F.; BOULDIN, D.R.; BLACK, C.A.; DUKE, F.R. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and ^{32}P - equilibration. **PlantandSoil**, Dordrecht, v. 6, p. 391-408, 1955.
- ANDRADE, A.G; HAAG, H.P; OLIVEIRA, G.D; SARRUGE, J.R. Acumulação diferencial de nutrientes por cinco cultivares de milho (*Zeamays* L.). In: Acumulação de macronutrientes. **Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, Piracicaba, v.32, p.115-149, 1975.
- ANDRADE, F.V.; MENDONÇA, E.S.; ALVAREZ, V.H.; NOVAIS, R.F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1003-1011, 2003.
- ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 873-928.
- ANGHINONI, I.; BISSANI, C.A. Fósforo e adubos fosfatados. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J. & CAMARGO, F.A.O. (Eds.). **Fertilidade do solo e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre, Genesis, 2004. v.1. p.117-138.
- ARAÚJO, M.S.B.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar. II. formas disponíveis e efeito residual do P acumulado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, p.397-403, 1993.
- ASHLEY, K., CORDELL, D., MAVINIC, D. A brief history of phosphorus: From the philosopher’s stone to nutrient recovery and reuse. **Chemosphere**, v.84: p.737–746, 2011.
- BARBER, S.A. Soil-plant interaction in the phosphorus nutrition of plants. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Eds.). **The role of phosphorous in agriculture**. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p. 591-615.
- BARROW, N.J. The four laws of soil chemistry: the Leeper lecture 1998. **Australian Journal of Soil Science**, v.37, p.787-829, 1999.
- BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 241f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and crop systems in southern Brazil. **Soil&TillageResearch**, v.54: p.101-109, 2000.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedade dos solos** 3ed, Porto Alegre, 2013, 685 p.

- BITTIMAN, S.; KOWALENKO, C.G.; HUNT, D.E.; FORGE, T.A.; WU, X. Starter phosphorus and broadcast nutrients on corn with contrasting colonization by mycorrhizae. **Agron. J**, v.98, p.394-401, 2006.
- CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BULL, L.T; CANTARELLA, H. Ed. **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1993. p.147-196.
- CARNEIRO, R.F.V.; EVANGELISTA, A.R.; TONELLI, M.T.L.; REIS, S.T. Inoculação com fungos micorrízicos em alfafa (*Medicago sativa* L.) em solo com doses crescentes de fósforo. **Ciência e Agrotecnologia**, v.26, p.618-625, 2002.
- CHANG, S.C; JACKSON, M.L. **Fractionation of soil phosphorus**. University of Wisconsin, p.133-144, 1957.
- CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; FONTOURA, S.N.V.; ERNANI, P.R.; ALBUQUERQUE, J.A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.33, p.1161-1164, 2003.
- CLAESSEN, M.E.C.; BARRETO, W.O.; PAULA, J.L.; DUARTE, M.N. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Atual, 1997. 212p.
- DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. 2007. 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. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS/UFV. p. 92-132.
- DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B.; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.N. **Manual de métodos de análise de solos**. 2 ed., Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.
- EIRA, A.F. Solubilização microbiana de fosfatos. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. **Microbiologia do solo**. Campinas: SBCS, 1992. p.243-255.
- ERICH, M.S.; FITZGERALD, C.B.; PORTER, G.A. The effect of organic amendments on phosphorus chemistry in a potato cropping system. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v.88, p.79-88, 2002.
- ERNANI, P.R; NASCIMENTO, J.A.L; CAMPOS, M.L; CAMILLO, R.J. Influência da combinação de fósforo e calcário no rendimento de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.24, p.537-544, 2000.
- FASSBENDER, H. W. **Química de suelos: Con énfasis en suelos de America Latina**. San José, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1994, 422 p.
- FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO E IRRIGAÇÃO. **Área de plantio direto no Brasil**. Disponível em http://www.febrapdp.org.br/download/PD_Brasil_2013.jpg. Acessado em 01 jan. 2014.
- FIXEN, P.E. World fertilizer nutrient reserves - a view to the future. **Better Crops**, v.93:p.8-11, 2009.
- FIXEN, P.E.; GROVE, J.H. Testing soils for phosphorus. In: WESTERMAN, T.L. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. 3 ed. Madison: Soil Science Society of America, 1990, p. 141-180.

FRANCHINI, J.C.; HOFFMANN-CAMPO, C.B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, A. Organic composition of green manure during growth and its effect on cation mobilization in an acid Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, p.2045-2058, 2003.

FRANCHINI, J.C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A.L.; FARIAS, J.R.B. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Londrina, Embrapa Soja, 2009, 39 p.

FRANCHINI, J.C.; COSTA, J.M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para produção agrícola sustentável no Paraná**. EmbrapaSoja, Londrina-PR, 2011. 52 p.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N.; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 137, p. 178-185, 2012.

FREIRE, F.M; OLIVEIRA, L.A; FRANÇA, G.E; COUTO, L; ALVES, V.M.C; RESENDE, M. Efeito da relação fósforo/água na nutrição do milho em areia quartzosa. In: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 22, 1998, Recife. Globalização e Segurança Alimentar. **Resumos...** Recife: ABMS, CNPMS/EMBRAPA, IPA, 1998.p 143.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo às plantas**. Santa Maria, UFSM, 2003, 231p. (Tese de doutorado).

GLASS, A. D. M.; BEATON, J. D.; BOMKE, A. **The role of P in plant nutrition**. Calgary: Western Canada Phosphate Symposium, 1980.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo: exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 664-668, 2006.

GUIMARÃES, M.F; FONSECA, I.C.B; BROSSARD, M; PORTELLA, C.M.R; BRITO, O.R; RITCHIE, J.C. Monitoring changes in the chemical properties of an oxisol under long-term no-tillage management in subtropical Brazil. **Soil Science**, v. 173, no. 6, p.408-416, 2008

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.

HALVORSON, A.D.; ALLEY, M.M.; MURPHY, L.S. Nutrient requirements and fertilizer use. In: HEYNE, E.G. **Wheat and wheat improvement**. 2ed. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1987, p.345-383.

HEDLEY, M.J.; STEWART, W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubation. **Soil Science Society of America Journal**, v.46, 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**, Dordrecht, v. 237, p. 173-195, 2001.

HIROCE, R.; FURLANI, A.M.C; LIMA, M. **Extração de nutrientes na colheita por populações e híbridos de milho**. Campinas: Instituto Agronômico, 1989. 24p.

ISHERWOOD, K.F. World plant nutrient resources: directions for the next century. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. de. (Ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa: SBCS, Lavras: UFLA/DCS, 1999. P. 123-142.

JOHNSTON, A.E. **Soil and plant phosphate**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2000. 49 p.

JONES, D.L. Organic acids in the rhizosphere - a critical review. **PlantandSoil**, v.205, p.25–44, 1998.

LANTMANN, A.F.; ROESSING, A.C.; SFREDO, G.J.; OLIVEIRA, M.C. **Adubação fosfatada e potássica para a sucessão soja-trigo em Latossolo Roxo distrófico sob semeadura direta**. Londrina: EmbrapaSoja, 1996.

LOPES, A.S.; COX, F.R. A survey of the fertility status of surface soils under “Cerrado” vegetation in Brazil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 41, p. 742-747, 1977.

LOPES, A.S.; WIETHOLTER, S.; GUILHERME, L.R.G.; SILVA, C.A.S. **Sistema Plantio Direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo, ANDA, 2004. 110 p.

MALAVOLTA, E. O fósforo na planta e interações com outros elementos. In: In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Eds). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, POTAFOS, 2004. p.117-149.

MALAVOLTA, E. Mineral nutrition of higher plants: the first 150 years. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. (Ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, 1999. p. 51-122.

MARIANO, I.O.S.; FERNADES, L.A.; FAQUIN, V.; ANDRADE, A.T. Phosphorus critical levels and availability in lowland soils cultivated with flooded rice. **Scientia Agricola**, v.59, p.113-120, 2002.

MEHLICH, A. Determination of P, Ca, Mg, K, Na, and NH₄. Raleigh, North Carolina Soil Test Div., 1953. **Nãopublicado**.

MENDONÇA, E.S.; ROWELL, D.L. Mineral and organic fractions of two Oxisols and their influence on the effective cation-exchange capacity. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, p.1888-1892, 1996.

MODEL, N.S.; ANGHINONI, I. Respostas do milho a modos de aplicação de adubos e técnicas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.55-59, 1992.

MORAES, M.T. **Qualidade física do solo sob diferentes tempos de adoção e de escarificação do sistema plantio direto e sua relação com a rotação de culturas**. Santa Maria, RS, UFSM, 2013. (Dissertação de mestrado).

MUNSON, R.D. Phosphorus and crop quality. In: POTASH AND PHOSPHATE INSTITUTE. **Phosphorus in agriculture: a situation analysis**. Atlanta, 1978. p. 107-112.

MURPHY, J., RILEY, J. P. A Modified Single Solution Method for the Determination of Phosphate in Natural Waters. **Analytica Chimica Acta**, 27:31-36, 1962.

MUZILLI, O. A adubação fosfatada no Estado do Paraná. In: OLIVEIRA, A.J.; LOURENÇO, S.; GOEDERT, W. (Eds.). **Adubação fosfatada no Brasil**. Brasília, Embrapa, 1982, p.61-101.

MUZILLI, O. A fertilidade do solo no sistema de plantio direto. In: Simpósio sobre fertilidade do solo e nutrição de plantas no sistema de plantio direto. Ponta Grossa, 2000. **Anais**. Ponta Grossa, Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais, 2000.p.1-16.

MUZILLI, O. O uso dos solos na mata araucária. In ARAUJO, Q.R. **Edição 500 anos de uso do solo no Brasil**. Ilhéus, Editora: Editus, 2002.p.435-445.

NOVAIS, R.F.; KAMPRATH, E.J. Parâmetros das isotermas de adsorção de fósforo como critério de recomendação de adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.3, p.37-41, 1979.

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

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J.C. L. **Fertilidade do Solo**. 1ª ed. Viçosa, MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 96-99, 471-500.

NZIGUHEBA, G.; PALM, C.A.; BURESH, R.J.; SMITHSON, P.C. Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. **Plant and Soil**, v.198, p.159- 168, 1998.

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, p.251-256, 1996.

PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Organic compounds from plant extracts and their effect on soil phosphorus availability. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p. 1379-1388, 2000.

PEIRETTI, R.A. **No Till Improves Soil Functioning and Water Economy**. FAO, 2014, 6p.

PICCININ, J. L. **Modificações no perfil de solo sob plantio direto contínuo e com intervenções mecânicas sob sucessão e rotação de culturas**. 2005. 112 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2005.

PRADO, R.M; FERNANDES, F.M; ROQUE, C.G. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação de doses de fósforo em adubação de manutenção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.83-90, 2001.

PROCHNOW, L.I.; QUISPE, J.F.S.; FRANCISCO, E.A.B.; BRAGA, G. Effectiveness of Phosphate Fertilizers of Different Water Solubilities in Relation to Soil Phosphorus Adsorption. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n.4, p. 333-340, 2006.

RAIJ, B.van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo, Ceres, 1991. 343p.

RAIJ, B. van. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.2, p.1-9, 1978.

RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas, Instituto Agrônomo, 1983. 31 p. (Boletim Técnico, 81).

RAIJ, B. van.; FEITOSA, C.T. Correlação entre o fósforo extraído de solos por diversos extratores químicos e o absorvido pelo milho. **Bragantia**, Campinas, v.39, p.51-57, 1980.

RAIJ, B. van.; FEITOSA, C.T.; SILVA, N.M. Comparação de quatro extratores de fósforo de solos. **Bragantia**, Campinas, v.43, p.17-29, 1984.

REICHERT, J. M.; SUZUKY, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 5, p. 49-134, 2007.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo na biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p.589-597, 2000.

RHOTON, F. E. Influence of time on soil response to no-till practices. **Soil Sci. Soc. Am. J.**v.64, p.700-709, 2000.

RYAN, P.R.; DELHAIZE, E.; JONES, D.L. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots. **Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology**, v.52, p.527-560, 2001.

SÁ, J.C.M. **Manejo da fertilidade do solo no plantio direto**. Castro: Fundação ABC, 1993.96p.

SÁ, M.E.; BUZEETI, S. (Coord.). **Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas**. São Paulo: Ícone Editora, 1994. 437 p.

SÁ, J.C.M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FACHIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. (Eds.). **Soil fertility, soil biology, and plant nutrition interrelationships**. Lavras: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, UFLA, 1999, p.267-320.

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; LAL, R.; DICK, W.A.; VENZKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.; FEIGL, B. Organic matter dynamics and sequestration rates for a tillage sequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p.1486-1499, 2001.

SÁ, J.C.M. Adubação fosfatada no sistema plantio direto. In: YAMADA, T.; ABDALLA, R.S. (Eds.). **Fósforo na agricultura brasileira**, Piracicaba, Potafós, 2004, 726p.

SÁ, M.F.M. **Abordagem quantitativa na predição espacial de atributos do solo e geração de zonas de manejo agrícola**. 2001. 117 f. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J.; RACZ, G.J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. Eds. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison, American Society of Agronomy, 1980.p.263-310.

SANTOS, H.P.; TOMM, G.O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. **Ciência Rural**, v.33, p 477-486, 2003.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRELAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F; OLIVEIRA, J.B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF, Embrapa, 2013, 353 p.

SCHLINDWEIN, J.A. **Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob plantio direto**. Porto Alegre, UFRGS, 2003, 169p. (Tese de doutorado).

SHARPLEY, A.N; SMITH, S.J.; JONES, O.R.; DERG, W.A.; COLEMAN, G.A. The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. **J. Environ. Qual.**, v.21, p.30-35, 1992.

SHARPLEY, A.N.; HALDORSON, A.D. The management of soil phosphorus availability and its impact on surface water quality. **Adv. Soil Science**, p.7-90, 1994.

SHARPLEY, A.N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. **J. Environ. Qual.**, v.24, p.920-926, 1995.

SIDIRAS, N.; PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 9, p.249-254,1985.

SILVA, F.C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 2009,627 p.

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

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 11. ed. Washington, DC: USDA/NRCS, 2010. 338 p.

SPOSITO, G. **The Chemistry of Soils**. Oxford University Press, New York, 1989. 304p.

STAUFFER, M.D; SULEWSKI, G. Fósforo essencial para a vida. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Eds). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, POTAFOS, 2004. p.117-149.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, Lancaster, v. 157, p. 423-447, 2003.

VIÉGAS, R.A. **Dinâmica de fontes de fósforo aplicadas a solos com diferentes níveis de acidez**. Viçosa, MG, UFV, 1991. 67p. (Dissertação de mestrado).

WARRICK, A.W; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL,D., ed.Applications of soil physics. **NewYorkAcademic Press**, 1980. p.319-344.

YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Eds). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, POTAFOS, 2004. p.117-149.

ZONTA, E.; BRASIL,F.C.; GOI, S.; ROSA, M.M.T. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.7-52.