

MARCO ANDRÉ GROHSKOPF

**INTERAÇÃO ENTRE FÓSFORO E NITROGÊNIO EM FERTILIZANTE
ORGANOMINERAL**

Botucatu

2017

MARCO ANDRÉ GROHSKOPF

**INTERAÇÃO ENTRE FÓSFORO E NITROGÊNIO EM FERTILIZANTE
ORGANOMINERAL**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Dirceu Maximino Fernandes

Coorientador: Juliano Corulli Corrêa

Botucatu

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

G875i Grohskopf, Marco André, 1988-
Interação entre fósforo e nitrogênio em fertilizante organomineral / Marco André Grohskopf. - Botucatu: [s.n.] , 2017
135 p.: il., color., grafs., tabs.

Tese(Doutorado) - Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2017
Orientador: Dirceu Maximino Fernandes
Coorientador: Juliano Corulli Corrêa
Inclui bibliografia

1. Nitrogênio na agricultura. 2. Fertilizantes fosfatados. 3. Minerais na nutrição de plantas. I. Fernandes, Dirceu Maximino. II. Corrêa, Juliano Corulli. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. IV. Título.

Elaborada por Maria Lúcia Martins Frederico - CRB-8:5255

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: INTERAÇÃO ENTRE FÓSFORO E NITROGÊNIO EM FERTILIZANTE ORGANOMINERAL

AUTOR: MARCO ANDRÉ GROHSKOPF


ORIENTADOR: DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

COORIENTADOR: JULIANO CORULLI CORRÊA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES
Depto de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu


Prof. Dr. ROBERTO LYRA VILLAS BOAS
Depto de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu


Prof. Ass. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO
Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP - Câmpus de Botucatu


Dr. PAULO CÉSAR TEIXEIRA
Depto. Fertilidade do Solo / Embrapa Solos


Profa. Dra. ROSEMARY MARQUES DE ALMEIDA BERTANI
Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios / APTA - Regional Bauru

Botucatu, 21 de novembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Botucatu, pela oportunidade de estudo de qualidade e desenvolvimento profissional.

À Embrapa Suínos e Aves, pelo apoio e suporte no desenvolvimento do trabalho de pesquisa.

À Embrapa Solos, pela colaboração no trabalho de pesquisa.

Ao Professor Dr. Dirceu Maximino Fernandes, pela orientação, paciência, apoio e ensinamentos transmitidos.

Ao Dr. Juliano Corulli Corrêa, pela orientação, apoio, amizade e contribuições durante o trabalho de pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Agricultura), pelos ensinamentos transmitidos e o aprendizado adquirido durante a realização do doutorado.

Aos colegas Caio Vilela Cruz, Igor Vilela Cruz, Natália Rodrigues Ferreira-Eloy, Kassiano Rocha, Débora Latorre, Thais Botamede Spadoni, Amanda Zolet Rigo, Caio Alexandre Ferreira Moreira, Tiago Pereira da Silva Corrêa, Sidnei Marcelino Lauriano, Tito Manuel Rondon Alves Barbosa, Magnun Antônio Penariol da Silva, Alisson Augusto Barbieri Mota e dentre tantos outros que foram importantes durante este período em minha vida.

Aos funcionários e pós-graduandos ligados ao departamento de Agricultura e ligados ao Programa de Pós-graduação.

A todos os meus familiares, em especial a Ciliane Regina Rückl e Sandra Camile Almeida Mota.

Aos contribuintes, pelos impostos que em parte são convertidos para a ciência.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo suporte financeiro durante o período do doutorado.

“É paradoxo, ainda verdadeiro, dizer que quanto mais nós sabemos mais ignorantes nos tornamos no senso absoluto, pois é somente através da iluminação que nos tornamos conscientes de nossas limitações. Precisamente um dos resultados mais gratificantes da evolução intelectual é a abertura contínua de novas e maiores perspectivas”.

(Nikola Tesla)

RESUMO

A adubação é dentre as práticas agrícolas a de maior relevância para estabelecer novos patamares de produção, com ênfase para as inovações em fertilizantes. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da interação entre fósforo (P) e nitrogênio (N) em fertilizante organomineral a base de cama de aves no sistema solo-planta em Latossolo Vermelho Distroférico. Três experimentos foram realizados em delineamento inteiramente casualizado, onde o primeiro (experimento 1) foi conduzido em casa de vegetação, com os tratamentos correspondentes ao equivalente a cinco doses crescentes de P (0, 20, 40, 60 e 80 kg ha⁻¹) em interação com cinco doses crescentes de N (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹); o segundo experimento (experimento 2) de incubação em placas de petri foi realizado em condições de laboratório, com os tratamentos constituídos de sete doses de P (0, 1,3, 1,8, 2,5, 3,8, 5 e 10 mg/placa) com a dose de interação de N fixa em 5,5 mg/placa para avaliar a mobilidade e disponibilidade do N inorgânico (N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻); e, o terceiro experimento (experimento 3) foi realizado em condições semelhantes ao experimento 2, com os tratamentos constituídos de sete doses de N (0, 4,4, 8,8, 11,7, 17,5, 24,8 e 32,1 mg/placa) com a dose de interação de P fixa em 8,8 mg/placa para avaliar a disponibilidade e difusão do P. No experimento 1, foram realizados três cultivos sequenciais de milho com 40 dias de crescimento cada para determinar a produção de biomassa seca e os teores de P e N. Após cada cultivo foram coletadas amostras de solo dos vasos para a análise das formas de P e N. Nos experimentos 2 e 3, para as análises de N e P foi amostrado nas placas de petri, o solo em anéis concêntricos com diferentes distâncias a partir do ponto central de deposição dos grânulos dos fertilizantes (0-7,75; 7,76-13,5; 13,51-25,5; e 25,51-43 mm) em cinco tempos de incubação (7, 14, 21, 28 e 35 dias). Houve efeito de interação de fósforo×nitrogênio (P×N) com a adubação por fertilizantes organominerais, com efeito mais pronunciado sobre as plantas do que no solo. As maiores respostas da interação P×N ocorreram no primeiro cultivo de milho para N, enquanto, que para o P houve efeito nos três cultivos realizados. As respostas de acúmulo de P e N na parte aérea de milho são demonstradas quando a interação P×N ocorre em doses iguais ou superiores à 20×100 e 40×50 kg ha⁻¹ presentes no fertilizante organomineral, respectivamente. As doses de P ou N em interação no fertilizante organomineral promoveram alterações químicas na região do solo ao redor dos grânulos do fertilizante que influenciam na mobilidade e disponibilidade do P e do N inorgânico na forma de N-NH₄⁺ ou N-NO₃⁻. Para o P houve deslocamento até a seção 2 (7,76-13,5 mm) com os maiores teores aos 7 dias de incubação, enquanto, para o N houve deslocamento até a seção 2 para o N-NH₄⁺ e até a seção 4 (25,51-43 mm) mais afastada dos grânulos dos fertilizantes para o N-NO₃⁻ com maior mobilidade.

Palavras-chave: Cama de aves. Fertilizante mineral. Mobilidade. Relação.

ABSTRACT

Fertilization is the most important agriculture practice to establish new production levels, highlighted on fertilizer innovations. The aim of this research was to evaluate the effect of phosphorus (P) and nitrogen (N) interaction rates on organomineral fertilizer from poultry litter into the soil-plant system in a Typic Hapludox (Oxisol). Two experiments were carried out in a completely randomized design, where the first one (Experiment 1) was conducted in greenhouse, with treatments corresponding to the equivalent of five increasing doses of P (0, 20, 40, 60 e 80 kg ha⁻¹) in interaction with five increasing doses of N (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹); and the second experiment (Experiment 2) in petri dishes incubation was conducted under laboratory conditions, with the treatments consisting of seven concentrations of P (0, 1,3, 1,8, 2,5, 3,8, 5 e 10 mg kg⁻¹) with the N interaction dose fixed in 5 mg kg⁻¹ to evaluate the mobility and availability of inorganic N (NH₄⁺-N e NO₃⁻-N) and, seven concentrations of N (0, 4,4, 8,8, 11,7, 17,5, 24,8 e 32,1 mg kg⁻¹) with the P interaction dose fixed in 8,8 mg kg⁻¹ to evaluate the availability and diffusion of P. In experiment 1, three sequential millet crops were performed with 40 days of growth each to determine the shoot dry biomass yield and P and N contents to calculate the accumulation. After each cultivation were collected the soil into the pots for analysis of P and N forms. In experiment 2, for the P and N analysis were sampled in petri dishes, the soil in concentric cylinders with different distances from the deposition central point of fertilizers granules (0–7,75; 7,76–13,5; 13,51–25,5; and 25,51–43 mm) in five incubation times (7, 14, 21, 28 and 35 days). There were interaction effects of phosphorus×nitrogen (P×N) with fertilization by organomineral fertilizers, with more pronounced effects on plants than on soil. The highest interaction of P×N occurs in the first millet crop for N, whereas for P there are effects on three crops performed. The accumulation responses of P and N in shoot dry biomass of millet are demonstrated when the interaction P×N occur in doses equal or superior to 40×50 and 20×100 kg ha⁻¹ present in organomineral fertilizer, respectively. Concentrations of P or N in interaction in organomineral fertilizer promote chemical changes in the soil region around the fertilizer granules that influence the mobility and availability of P and inorganic N in the NH₄⁺-N e NO₃⁻-N forms. For P there was displacement until the section 2 (7,76–13,5 mm) with the highest content at 7 days of incubation, while, for N there was displacement up to section 2 to NH₄⁺-N and up to section 4 (25,51–43 mm) further away from the fertilizer granules for NO₃⁻-N with highest mobility.

Keywords: Poultry litter. Mineral fertilizer. Mobility. Relation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Representação das seções da placa de petri com solo utilizadas para análise no experimento48
- Figura 2 – Teor de nitrogênio na forma de amônio ($N-NH_4^+$) em Latossolo Vermelho Distroférico nas seções em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Legenda – Seção 1 = 0 – 7,75 mm; Seção 2 = 7,76 – 13,50 mm; Seção 3 = 13,51 – 25,50 mm; e Seção 4 = 25,51 – 43,0 mm. Barras verticais em cada ponto representam o erro padrão dos valores. Médias com letras distintas diferem pelo teste de LSD ($p \leq 0,05$) dentro de cada seção.....50
- Figura 3 – Teor de nitrogênio na forma de nitrato ($N-NO_3^-$) em Latossolo Vermelho Distroférico nas seções em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Legenda – Seção 1 = 0 – 7,75 mm; Seção 2 = 7,76 – 13,50 mm; Seção 3 = 13,51 – 25,50 mm; e Seção 4 = 25,51 – 43,0 mm. Barras verticais em cada ponto representam o erro padrão dos valores. Médias com letras distintas diferem pelo teste de LSD ($p \leq 0,05$) dentro de cada seção.....53
- Figura 4 – Teor de nitrogênio mineral ($N-NH_4^+ + N-NO_3^-$) em relação ao nitrogênio total em Latossolo Vermelho Distroférico nas seções em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Seção 1 = 0 – 7,75 mm; Seção 2 = 7,76 – 13,50 mm; Seção 3 = 13,51 – 25,50 mm; e Seção 4 = 25,51 – 43,0 mm. Médias com letras distintas diferem pelo teste de LSD ($p \leq 0,05$) dentro de cada seção.....55
- Figura 5 – Soma dos teores de nitrogênio mineral ($N-NH_4^+$ ou $N-NO_3^-$) em Latossolo Vermelho Distroférico em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Somatório das seções 1 (0 – 7,75 mm), 2 (7,76 – 13,50 mm), 3 (13,51 – 25,50 mm) e 4 (25,51 – 43,0 mm). * N/P = Dose de N / Dose de P (mg/placa).....57
- Figura 6 – Capacidade máxima de adsorção de fósforo do Latossolo Vermelho Distroférico em condições naturais antes da instalação do experimento, ajustado por meio da curva de adsorção à isoterma de Langmuir.....67
- Figura 7 – Teor de fósforo (P) disponível (Mehlich-1) em Latossolo Vermelho Distroférico nas seções em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Legenda – Seção 1 = 0 – 7,75 mm; Seção 2 = 7,76 – 13,50 mm; Seção 3 = 13,51 – 25,50 mm; e Seção 4 = 25,51 – 43,0 mm. Barras verticais em cada ponto representam o erro padrão dos valores. Médias com letras distintas diferem pelo teste de LSD ($p \leq 0,05$) dentro de cada seção71

- Figura 8 – Distribuição dos teores de fósforo (P) disponível (Mehlich-1) proveniente dos fertilizantes nas seções em Latossolo Vermelho Distroférico nas seções em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Médias com letras distintas diferem pelo teste de LSD ($p \leq 0,05$). Valores descontados do tratamento controle sem adubação.....74
- Figura 9 – Soma dos teores de fósforo (P) disponível (Mehlich) em Latossolo Vermelho Distrófico em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Somatório das seções 1 (0 – 7,75 mm), 2 (7,76 – 13,50 mm), 3 (13,51 – 25,50 mm) e 4 (25,51 – 43,0 mm). * = $p \leq 0,05$; ** = $p \leq 0,01$77
- Figura 10 – Acúmulo de fósforo (P) na parte aérea de milho em três cultivos sequenciais com 40 dias cada em Latossolo Vermelho Distroférico em resposta a aplicação de fertilizante organomineral a base de cama de aves em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N). Letras minúsculas representam a diferença entre doses de N (eixo “y”) dentro da dose de P e maiúsculas a diferença entre as doses de P (eixo “x”) dentro da dose N pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).....100
- Figura 11 – Acúmulo de nitrogênio (N) na parte aérea de milho em três cultivos sequenciais com 40 dias cada em Latossolo Vermelho Distroférico em resposta a aplicação de fertilizante organomineral a base de cama de aves em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N). Letras minúsculas representam a diferença entre doses de N (eixo “y”) dentro da dose de P e maiúsculas a diferença entre as doses de P (eixo “x”) dentro da dose N pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).....102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos iniciais da camada de 0,0 a 0,2 m do Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf) utilizado no experimento. Botucatu, SP, 2014.....	45
Tabela 2. Característica final dos fertilizantes utilizados e a quantidade aplicada para compor cada tratamento de nitrogênio com as doses de interação de fósforo.....	46
Tabela 3. Característica final dos fertilizantes utilizados e a quantidade aplicada para compor cada tratamento de fósforo com as doses de interação de nitrogênio.....	69
Tabela 4 – Teor de fósforo (P) total, P orgânico total e P inorgânico no solo após cultivos sequenciais de milho em resposta a aplicação de fertilizante organomineral em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N). Médias dos três cultivos.....	92
Tabela 5 – Teor de fósforo (P) disponível do solo (mg kg ⁻¹) após cultivos sequenciais de milho em resposta a aplicação de fertilizante organomineral em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N).....	93
Tabela 6 – Teor de nitrogênio (N) total e N hidrolisado ⁽¹⁾ do solo após cultivos sequenciais de milho em resposta a aplicação de fertilizante organomineral em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N).....	94
Tabela 7 – Formas nitrogênio orgânico nas (mg kg ⁻¹) do solo após cultivos sequenciais de milho em resposta a aplicação de fertilizante organomineral em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N). Médias dos três cultivos.....	96
Tabela 8 – Biomassa seca da parte aérea de milho em três cultivos sequenciais com 40 dias cada em Latossolo Vermelho Distroférico em resposta a aplicação de fertilizante organomineral a base de cama de aves em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N).....	98
Tabela 9 – Eficiência da interação para a produção de biomassa seca (BS) da parte aérea de milho. Valores calculados com base na soma BS dos três cultivos de milho.....	98
Tabela 10 – Eficiência da interação para o acúmulo de fósforo (P) da parte aérea de milho. Valores calculados com base na soma dos acúmulos de P dos três cultivos de milho.....	101
Tabela 11 – Eficiência da interação para o acúmulo de nitrogênio (N) da parte aérea de milho. Valores calculados com base na soma dos acúmulos de N dos três cultivos de milho.....	103

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	19
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1 Fertilizantes organominerais.....	21
2.2 Dinâmica do nitrogênio e do fósforo.....	25
2.2.1 Nitrogênio.....	25
2.2.2 Fósforo.....	30
2.3 Interação fósforo × nitrogênio.....	35
3 HIPÓTESES.....	40
4 OBJETIVO.....	40
4.1 Objetivos específicos.....	40
5 CAPÍTULO 1 – MOBILIDADE DO NITROGÊNIO NO SOLO EM INTERAÇÃO COM CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO NO FERTILIZANTE ORGANOMINERAL.....	41
RESUMO.....	41
ABSTRACT	41
5.1 Introdução.....	43
5.2 Material e métodos.....	44
5.2.1 Caracterização do solo utilizado no experimento.....	44
5.2.2 Delineamento experimental.....	45
5.2.3 Produção dos fertilizantes.....	45
5.2.4 Experimento placas de petri.....	46
5.2.5 Análise química do solo retirado das seções das placas de petri.....	48
5.2.6 Análise estatística.....	48
5.3 Resultados e discussão.....	49
5.4 Conclusões.....	58
5.5 Referências.....	58
6 CAPÍTULO 2 – DIFUSÃO DO FÓSFORO EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE NITROGÊNIO	63
RESUMO.....	63
ABSTRACT	64
6.1 Introdução.....	65
6.2 Material e métodos.....	66
6.2.1 Caracterização do solo utilizado no experimento.....	66
6.2.1 Fósforo remanescente e capacidade máxima de adsorção de fósforo do Latosolo Vermelho Distroférico.....	67
6.2.3 Delineamento experimental.....	68
6.2.4 Produção dos fertilizantes.....	68

5.2.4	Experimento placas de petri.....	69
5.2.5	Análise química do solo retirado das seções das placas de petri.....	69
5.2.6	Análise estatística.....	69
6.3	Resultados e discussão.....	70
6.4	Conclusões.....	78
6.5	Referências.....	78
7	CAPÍTULO 3 – INTERAÇÃO ENTRE FÓSFORO E NITROGÊNIO EM FERTILIZANTE ORGANOMINERAL.....	83
	RESUMO.....	83
	ABSTRACT	84
7.1	Introdução.....	85
7.2	Material e métodos.....	86
7.2.1	Caracterização do solo utilizado no experimento experimental.....	86
7.2.2	Delineamento experimental.....	87
7.2.3	Elaboração dos fertilizantes organominerais.....	87
7.2.4	Experimento de plantas.....	88
7.2.5	Métodos analíticos nas plantas.....	88
7.2.6	Métodos analíticos no solo.....	89
7.2.7	Análise de fósforo.....	89
7.2.8	Análise das frações do nitrogênio orgânico.....	89
7.2.9	Análise estatística.....	91
7.3	Resultados e discussão.....	91
7.4	Conclusões.....	104
7.5	Referências.....	105
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
9	REFERÊNCIAS.....	111
	APÊNDICE A.....	121

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil possui imensa capacidade de contribuir com a demanda no aumento da produção de alimentos ocasionada pelo constante crescimento da população mundial, pois, utiliza técnicas e tecnologias na produção capazes de atingir incrementos de produtividade em muitas culturas agrícolas. Entretanto, a maioria do sucesso da produção agrícola brasileira se deve, principalmente, ao uso de corretivos e fertilizantes.

A maior parte dos fertilizantes consumidos na agricultura são de origem mineral e importados, o que coloca o Brasil numa frágil situação de dependência deste insumo para a produção agrícola. Somada a isto, deve ser considerado que em geral os solos brasileiros das regiões produtoras de alimentos e energia são naturalmente deficientes em nutrientes, havendo a necessidade da adubação frequente e com altas doses de fertilizantes para a manutenção ou aumento dos níveis de produtividade das culturas, principalmente, com nitrogênio e fósforo.

O desenvolvimento e inovação de tecnologias para a produção de novos insumos para a correção e adubação são estratégicos para o agronegócio do País. O fluxo contínuo de conhecimentos técnicos e de novos insumos é uma condição necessária para a sustentabilidade do setor agrícola. Novos fertilizantes associados as melhores práticas de manejo dos nutrientes no sistema solo-planta contribuem para o gerenciamento eficiente e responsável na nutrição vegetal.

Fontes de fertilizantes utilizando matérias-primas disponíveis no país e que apresentem alta eficiência podem representar uma grande contribuição ao setor. Entre as fontes que podem contribuir com soluções a este problema está à disponibilidade de resíduos da produção de animais, urbanos e industriais com potencial de fornecimento de nutrientes.

Entre os resíduos com potencial fertilizante, a cama de aves é a mais utilizada, devido à abundância e facilidade de manipulação. A cadeia produtiva de aves no Brasil é uma atividade de grande escala e de importância econômica e social e, como resultado desta produção intensiva, uma grande quantidade de resíduo é produzida. É importante o reaproveitamento destes resíduos de forma eficiente e segura na adubação de culturas, minimizando os impactos ambientais.

A cama de aves pode ser utilizada na produção de fertilizantes organominerais, enriquecido com nutrientes na forma mineral, permitindo a elaboração de formulações

adaptadas as demandas nutricionais das culturas em diferentes classes de solo. Outra vantagem dos fertilizantes organominerais é a distribuição deste resíduo para longe das regiões com alta concentração da atividade avícola, além de permitir a reciclagem e reutilização dos nutrientes contidos neste resíduo orgânico.

Pouca atenção tem sido denotada aos fertilizantes organominerais, sendo escassos os trabalhos de pesquisa e informações científicas concretas em relação ao seu uso na agricultura. O conhecimento e o entendimento desta tecnologia de fertilizante pode contribuir de forma significativa com a agricultura, pois, além da adubação, o gerenciamento deste resíduo orgânico como parte da matéria-prima para fertilizantes pode auxiliar no ciclo do desenvolvimento sustentável para a cadeia produtiva de aves.

Dentre os nutrientes, o nitrogênio (N) e o fósforo (P) possuem grande importância para as plantas, sendo suas formas e concentrações no solo um grande fator determinante na produtividade das plantas. Ambos os nutrientes influenciam nas suas dinâmicas, entretanto, pouco se conhece sobre os mecanismos de interação e seus efeitos no solo e na planta.

As pesquisas em sua maioria são focadas no efeito isolado de P e N, sendo poucos os trabalhos que avaliem as respostas do uso combinado ou simultâneo destes elementos no solo. O conhecimento desta interação no sistema solo-planta é importante para uso eficiente destes nutrientes na adubação de culturas e para o desenvolvimento de novos fertilizantes.

Com base nestas considerações, este trabalho de pesquisa foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o efeito de doses de interação entre fósforo e nitrogênio em fertilizante organomineral a base de cama de aves na dinâmica destes nutrientes no solo e na planta em um Latossolo Vermelho Distroférrico.

Para tanto, foram realizados dois estudos, um para avaliar o efeito de diferentes doses de interação entre P e N em fertilizante organomineral na dinâmica destes nutrientes no solo e na nutrição do milheto. E, o outro estudo avaliou a disponibilidade e a mobilidade do fósforo e do nitrogênio inorgânico nas formas de amônio e nitrato na região do solo ao redor do grânulo dos fertilizantes organominerais em diferentes doses de interação destes elementos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Fertilizantes organominerais

Entre as práticas agrícolas, o uso de fertilizantes e corretivos são as com maior representatividade para o aumento de produtividade das culturas. Porém, nas últimas décadas muita ênfase tem sido denotada aos fertilizantes minerais de alta solubilidade em comparação aos poucos esforços científicos aos organominerais (CORRÊA et al., 2016). Sendo assim, insuficiente a compreensão da dinâmica dos fertilizantes organominerais sobre a fertilidade do solo e na nutrição de plantas.

O desenvolvimento e inovação de novos insumos para a adubação dos solos é estratégico para agricultura brasileira, pois, 75% dos fertilizantes consumidos no país são importados conforme a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2016), o que coloca o setor agrícola do país numa frágil situação de dependência. Somado a isto, em geral os solos brasileiros nas principais regiões produtoras agrícolas são naturalmente deficientes em nutrientes, havendo a necessidade da aplicação frequente e com altas doses de fertilizantes para a manutenção ou incremento nos níveis de produtividade da maioria das culturas (FAGERIA; BALIGAR, 2014; CORRÊA et al., 2016).

Nos últimos anos, os aumentos de produtividade agrícola no Brasil se basearam na inovação tecnológica, e assim, um fluxo contínuo de conhecimentos técnicos e de novos insumos é uma condição necessária para a sustentabilidade do setor. Cerca de 75% dos fertilizantes utilizados atualmente no Brasil e no mundo, e também os processos para sua obtenção, foram desenvolvidos nas décadas de 50 e 70 (SCOLARI, 2006). Além disso, grande quantidade dos nutrientes aplicados no solo via fertilizantes é perdida, pois a eficiência desses insumos ainda é baixa (BOARETTO et al., 2013; ROSOLEM; CALONEGO, 2013).

Futuramente, a produção agrícola deve crescer ainda mais, com uma previsão de projeção média de mais de 20% de aumento de produção para as principais culturas até 2026/27 (BRASIL, 2017). Neste sentido, a demanda por fertilizantes deve aumentar, sendo essencial para o sucesso da agricultura brasileira o desenvolvimento de novas técnicas e tecnologias para a adubação dos sistemas agrícolas. Portanto, o desenvolvimento de fontes de fertilizantes utilizando matérias-primas disponíveis no

país e que apresentem alta eficiência em disponibilizar nutrientes no sistema solo-planta pode representar uma grande contribuição ao setor.

O fertilizante organomineral por definição é o produto resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos, podendo ser apresentados na forma líquida (fluida) ou sólida. Atualmente, existem no Brasil cerca de 160 empresas que trabalham com esta tecnologia de fertilizantes, com representação de 3 e 35 % de todo fertilizante consumido na forma sólida e fluida em 2015 (ABISOLO, 2015). Porém, ainda existem poucos trabalhos científicos com estes fertilizantes para gerar informações consistentes e auxiliar este setor com grande potencial de crescimento.

De acordo com instrução normativa nº 25, de 23 de julho de 2009 (BRASIL, 2009), que estabelece as normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura, se estabelece as seguintes diretrizes:

I- Para fertilizantes organominerais sólidos o produto deve apresentar o mínimo de 8% de carbono orgânico (CO); CTC mínima de 80 mmol_c kg⁻¹; para produtos com macronutrientes primário isoladamente (N, P e K) ou em misturas (NP, NK, PK ou NPK) de 10%; para macronutrientes isolados ou em misturas de 5%, podendo conter N, P e K com no mínimo 1% para cada um deles; ou, para micronutrientes em isolado ou em misturas de 4%, podendo conter N, P e K com no mínimo 1% para cada um deles.

II- Para fertilizantes organominerais fluidos o produto deve apresentar o mínimo de 3% de CO; para produtos com macronutrientes primários isoladamente (N, P e K) ou em misturas (NP, NK, PK ou NPK) de 3%; para macronutrientes secundários isoladamente 2%, podendo ser adicionados macronutrientes primários, desde que se garanta no mínimo 1% para cada um deles; ou, para micronutrientes em isolado ou em misturas de 1%, podendo ser adicionado N, P e K com no mínimo 1% para cada um deles.

A eficiência dos fertilizantes organominerais sólidos e fluidos está associado a dinâmica dos nutrientes nas diferentes classes de solos. As fontes orgânicas utilizadas na construção destes fertilizantes introduzem no solo tanto formas inorgânicas solúveis, inorgânicas na forma de complexos e formas orgânicas (CORRÊA et al., 2018a).

Nestes fertilizantes parte dos nutrientes contidos se encontram em formas que não são imediatamente disponíveis e geralmente são liberadas lentamente no solo. Além disso, os compostos orgânicos parcialmente humificados presentes em sua estrutura também podem reter parte dos nutrientes, principalmente, catiônicos presentes na forma mineral, contribuindo para evitar perdas por lixiviação ou por fixação em minerais do solo em relação ao fertilizante exclusivamente mineral com ênfase à fertilização de base (FERNANDES et al., 2015; CORRÊA et al., 2016).

A presença de compostos orgânicos neste fertilizante pode atuar positivamente no crescimento e desenvolvimento vegetal, dependendo das concentrações utilizadas. Apesar destas vantagens: não se sabe as interações bioquímicas no solo; não se conhece o mecanismo de ação dessas substâncias em formulações; inexistem métodos para caracterização; e validação do seu uso em maior escala na agricultura. O conhecimento destas premissas permitirá sinalizar para o maior controle da disponibilidade nutriente, aumentando a eficiência de uso e rentabilidade, e também reduzindo as perdas e o impacto ambiental negativo (Corrêa et al., 2018b).

Para os fertilizantes fluidos outras vantagens podem ser denotadas, como: custo de produção, facilidade de manuseio, uniformidade de aplicação, menores perdas, versatilidade de formulações, facilidade na taxa de calibração, menos mão-de-obra, redução do custo da adubação e rendimento operacional (REHM; LAMB, 2010; ANTILLE; SAKRABANI; GODWIN, 2014). Porém, estes fertilizantes exigem maior nível de conhecimento técnico e tecnologias para a sua produção e uso na adubação de culturas de forma eficiente (Fernandes et al., 2015).

Alguns poucos trabalhos de pesquisa avaliaram a resposta da aplicação de fertilizantes organominerais na forma sólida demonstrando benefícios nas propriedades químicas do solo e semelhança ou até aumento na produtividade das culturas em comparação as fontes minerais tradicionais (TEJADA; BENITEZ; GONZALEZ, 2005; CORRÊA et al., 2016), sendo promissoras as perspectivas destes fertilizantes para uso na agricultura. Já, para fertilizantes organominerais na forma fluida são escassos os trabalhos de pesquisa em relação ao seu uso na adubação de culturas. Assim, o uso destes fertilizantes requer uma investigação científica aprofundada em condições experimentais para permitir a sua otimização na adubação do solo.

Um dos principais benefícios e vantagens que têm sido identificados e demonstrados até o presente momento para os fertilizantes organominerais em

relação as fontes minerais de adubação estão relacionadas ao P, onde a presença de compostos orgânicos no fertilizante pode reduzir a fixação desse nutriente aos colóides do solo e aumentar a eficiência deste elemento quando comparado a fonte mineral, principalmente, em solos de características oxídicas (CORRÊA et al., 2018b).

Entre os materiais orgânicos disponíveis para a construção de fertilizantes orgânicos, a cama de aves é o produto mais utilizado, devido à abundância, facilidade de aquisição e manipulação, e preço (ROGERI et al., 2016). Com base nos principais nutrientes demandados na agricultura e a quantidade de 16.243.286 toneladas de cama de aves produzidos pelo sistema de aves de corte (IPEA, 2012) é possível estimar a contribuição de 568.515, 645.731 e 487.287 toneladas de N, P₂O₅ e K₂O respectivamente, levando em consideração o teor médio na cama aves de 35, 40 e 30 g kg⁻¹ N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, em base seca.

Esta matéria prima seria responsável pelo reaproveitamento de 8% do N utilizado e de 27% do que é fabricado no Brasil, sendo estes valores mais expressivos de 10 e 20% para P₂O₅ e, 5 e 50% para K₂O, com base nas informações da ANDA (2016).

No Brasil há a necessidade do desenvolvimento de tecnologias que permitam o reaproveitamento deste resíduo gerado de cama de aves como fertilizantes orgânicos ou organominerais, pois existe o abate de aproximadamente 5,86 bilhões de aves de corte anualmente (IBGE, 2016). Sendo que, a projeção para esse agronegócio prevê taxa de crescimento anual médio de 2,6%, representando um aumento de 29,5% na produção até 2026/27 (BRASIL, 2017).

Neste cenário a geração de resíduos por esta cadeia produtiva deverá seguir a mesma proporção, demonstrando a necessidade de ações para o reaproveitamento da cama de aves como uma fonte alternativa eficiente e segura na agricultura e não apenas como um contaminante ambiental. Assim, a utilização da cama de aves associado a fontes minerais na produção de fertilizantes pode representar grande contribuição ao setor agrícola.

As poucas pesquisas com estes fertilizantes a base de cama de aves têm demonstrado benefícios nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo e, sobre a produtividade das plantas (CORRÊA et al., 2016). Porém, há a necessidade de mais trabalhos relacionados à produção de fertilizantes organominerais utilizando como matéria prima a cama de aves; bem como o conhecimento aprofundado das fontes utilizadas e suas interações; sua eficiência em relação aos fertilizantes minerais,

estabelecendo critérios técnicos para seu uso e formulação; descrevendo as doses de maior eficiência; e a dinâmica destes no sistema solo-planta.

Apesar do crescente uso desta tecnologia de fertilizantes na agricultura, de modo geral os trabalhos científicos com fertilizantes organominerais são incipientes. Os poucos trabalhos em sua maioria são focados, principalmente, nos elementos N e P na aplicação isolada sobre os componentes de rendimento das culturas, sendo escassos os trabalhos com o uso combinado dos elementos, ou, focado na construção e avaliação destes fertilizantes na presença de outros elementos como os macronutrientes secundários e micronutrientes.

2.2 Dinâmica do nitrogênio e do fósforo

2.2.1 Nitrogênio

O nitrogênio (N) é constituinte de vários compostos nas plantas e as principais reações bioquímicas envolvem a presença do N, o que o torna um elemento absorvido em grandes quantidades (MARIANO et al., 2017). Aproximadamente 25% do gasto energético dos vegetais está relacionado com as várias reações envolvidas na redução do nitrato (NO_3^-) a amônio (NH_4^+) e a sua posterior incorporação em formas orgânicas (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Por isso, o fornecimento inadequado para suprir a demanda da planta é um dos principais limitante a produção agrícola.

O NH_4^+ e o NO_3^- são as principais formas de N absorvidas pelas plantas, sendo a maior parte do NH_4^+ incorporado a compostos orgânicos nas raízes, enquanto que o NO_3^- devido a sua mobilidade no xilema pode ser encontrado nos vacúolos das raízes, folhas e em órgãos de armazenamento (EPSTEIN; BLOOM, 2006). A forma de chegada do N às raízes é predominantemente por fluxo de massa e o mecanismo de absorção é o ativo, com gasto de energia, enquanto, o transporte e redistribuição na planta ocorre sem problemas de impedimento no xilema e floema (TAIZ; ZEIGER, 2013).

O N é o elemento exigido em maior quantidade para a maioria das culturas, mas existe grande dificuldade na sua avaliação no solo, diante das inúmeras interações e formas que apresenta em seu ciclo. Devido a isto, o manejo e a recomendação da adubação de N são complexos, pois, sua dinâmica no solo envolve

diversos processos, sendo os principais: a dessorção, adsorção, lixiviação, fixação, volatilização, nitrificação, desnitrificação, imobilização e mineralização (ZHANG et al., 2011; MÜLLER et al., 2011).

Estas reações do N são afetadas e mediadas principalmente por fatores edafoclimáticos e microrganismos, não possuindo, portanto, sincronismo em suas interações no solo (SPARGO et al., 2016). Assim, a disponibilidade do N às plantas é mais complexa de ser avaliada em relação aos demais nutrientes, em função do grande número de reações que ocorrem com esse elemento no solo, da rapidez de algumas dessas transformações (MARIANO et al., 2017), e da inexistência de análises laboratoriais rápidas e simples que quantifiquem com confiança os valores presentes no solo numa determinada época de amostragem.

No solo, o ciclo do N é o resultado da ação de microrganismos autotróficos e heterotróficos, onde a atividade pelos microrganismos, principalmente a mineralização, controla todo o ciclo do N no ecossistema (SANTOS et al., 2008). Basicamente o ciclo do N no solo é representado por três subciclos denominados de elementar, autotrófico e heterotrófico, os quais possuem uma ou mais vias em comum, normalmente interligadas entre si.

No subciclo elementar ocorre a fixação biológica do N_2 atmosférico por microrganismos procariontes, a nitrificação por microrganismos quimiautotróficos e a desnitrificação por microrganismos anaeróbios facultativos (SANTOS et al., 2008). O subciclo autotrófico inclui a atividade dos vegetais e os produtos primários de substâncias orgânicas nitrogenadas, onde os vegetais através da fotossíntese transformam a energia solar em biomassa que quando incorporadas ao solo serve de fonte de carbono e energia aos microrganismos (SANTOS et al., 2008). E, o subciclo heterotrófico é constituído pela atividade de microrganismos nos processos de mineralização ou imobilização, que ocorrem em vias opostas, rompendo ou formando ligações orgânicas no solo (SANTOS et al., 2008).

A resultante dos processos entre mineralização e imobilização do subciclo heterotrófico determinam a dinâmica do ciclo do N no solo, pois regula a quantidade de N fornecido aos outros subciclos (SANTOS et al., 2008; SHARMA et al., 2017). Desta forma, a mineralização no solo pode ser considerada como um dos processos mais significativos do ciclo do N, sendo responsável pela transformação do N orgânico a formas orgânicas mais simples e assimiláveis até as formas inorgânicas. Sendo que para os produtos resultantes deste processo há componentes de imobilização, que

pela assimilação dos nutrientes influenciarão na multiplicação, crescimento e manutenção da microbiota do solo (NAKHONE; TABATAI, 2008; DANGA et al., 2009).

Como resultado destas diversas transformações que ocorrem no solo o N é acumulado em diversas formas orgânicas, com diferentes graus de estabilização, em formas de maior ou menor labilidade e recalitrância (GROHSKOPF et al., 2015), com diferentes taxas e sem sincronia de mineralização. Porém, sobre as formas e cadeias que o N orgânico se apresenta no solo pouco se conhece e foram identificadas pela ciência, sendo, portanto, a maior parte de natureza ainda desconhecida.

Dentre os compostos orgânicos nitrogenados estudados e identificados em maiores proporções, têm os aminoácidos como monômeros de proteínas e os açúcares aminados (PELTRE et al., 2017). Em pequenas proporções estudadas têm o N orgânico na forma de oligômeros (peptídeos) e polímeros (proteínas) e, uma grande quantidade de outros compostos de difícil separação e identificação química (CAMARGO; GIANELLO; VIDOR, 1999; PAUNGFOO-LONHIENNE et al., 2012).

A presença e distribuição das formas orgânicas de N no solo podem ser afetadas por fatores complexos, incluindo a síntese e distribuição pela atividade microbiana, interação com a fase mineral do solo na argila e por reações químicas complexas (CAMARGO; GIANELLO; VIDOR, 1999; ANTIL et al., 2011). O N se apresenta ligado ou inserido a estas cadeias carbônicas formadas através de pontes de hidrogênio, forças de Van der Waals ou por complexos covalentes (STEVENSON, 1994).

A liberação do N proveniente dos compostos orgânicos húmicos e não húmicos para a fase mineral ocorre a taxas variáveis e difíceis de serem preditas. Alguns trabalhos de pesquisa têm demonstrado que o N proveniente destes compostos orgânicos é constituído por formas prontamente mineralizáveis com taxa anual média de mineralização de 10% e por formas de cadeias orgânicas mais estáveis de difícil acesso aos microrganismos com taxas anuais menores que 0,6% (HERBERT, 1982; ANTIL et al., 2011). Porém, estes valores são extremamente variáveis de acordo com as características edafoclimáticas e solo inerentes a cada região, e da relação C/N dos compostos orgânicos presentes no solo.

Quando aplicados no solo os fertilizantes nitrogenados, como consequência dos processos de mineralização e imobilização, entre 20 e 50% do N proveniente dos fertilizantes é imobilizada e incorporada em estruturas orgânicas no solo, sendo sua disponibilidade as plantas dependentes do tipo de cadeia orgânica formada

(JACCQUIN et al., 1992; PAUNGFOO-LONHIENNE et al., 2012). Trabalhos avaliando esses processos no solo pela adubação nitrogenada têm demonstrado que 30% do N dos fertilizantes aplicados permanece no solo na forma orgânica após o primeiro cultivo e, aproximadamente 14% é aproveitado pelas plantas em cultivos posteriores (KELLEY; STEVENSON, 1995, MÜLLER et al., 2011).

Outros trabalhos com fertilizantes minerais têm demonstrado aproveitamento entre 10 a 65% do total utilizado pelas plantas (LARA-CABEZAS et al., 2000; ZHANG et al., 2011), sendo o restante atribuído ao N orgânico do solo, fração que representa 95% ou mais do N total acumulado no solo que podem ter alta ou baixa labilidade, dependendo do tipo de cadeia orgânica que esteja inserido (MULLER et al., 2011; GROHSKOPF et al., 2015). Lembrando que o N não faz parte dos constituintes minerais do solo, se apresentando em sua maior parte como constituinte da matéria orgânica do solo (MOS), a qual não possui sincronismo entre a liberação destes compostos orgânicos e a demanda de N pelas culturas (NAKHONE; TABATAI, 2008; NGUYEN; SHINDO, 2011).

Em virtude disso, na maioria dos solos, mesmo com teores N total suficientes para atender a demanda por este elemento por uma cultura durante seu ciclo, não há o fornecimento adequado de N e de forma sincronizada com as fases do crescimento e desenvolvimento. Estudando a adição do N no sistema solo, Paul e Clark (1996) identificaram e estimaram que a principal via foi pela fixação biológica do N_2 por microrganismos procariontes, com aproximadamente 55% da adição total, enquanto, os fertilizantes minerais contribuíram com apenas 26%, enquanto, que as perdas por lixiviação e desnitrificação representaram maior parte das perdas do N no solo.

A mineralização destes compostos orgânicos conduz a uma série de longas conversões do N orgânico de maior ou menor labilidade até como ponto final as formas inorgânicas de NH_4^+ e NO_3^- (PAUNGFOO-LONHIENNE et al., 2012). Independente do fertilizante aplicado no solo, o N proveniente é rapidamente transformado as formas de NH_4^+ e NO_3^- , sendo as formas de N mais facilmente disponíveis no solo e preferencialmente absorvidas pelas plantas. Mesmo em fertilizantes orgânicos, pois, a maioria dos compostos orgânicos presentes são de alta labilidade, em sua maioria na forma de aminoácidos, peptídeos e proteínas que são facilmente e rapidamente transformados as formas inorgânicas de N logo após a sua aplicação no solo (ZHANG et al., 2011; CORRÊA et al., 2016).

É importante frisar, que os fertilizantes nitrogenados são em geral bastante solúveis. Devido a estes fatores, o N proveniente dos fertilizantes é rapidamente disponibilizado no sistema solo e inserido no ciclo do N no ecossistema, estando sujeito as diversas reações que o N pode sofrer no solo se não absorvido pelas plantas. Contudo, além do ambiente do solo, o tipo de fertilizante aplicado pode influenciar na velocidade das reações do N, principalmente, a amonificação e a nitrificação (PAYET et al., 2009, ZHANG et al., 2011).

Estas formas inorgânicas de NH_4^+ e NO_3^- são pouco adsorvidas pelos colóides do solo, e quando adsorvidos formam ligações de caráter eletrostático de baixa energia de ligação nas cargas de superfície dos colóides, tanto nos argilominerais e óxidos como na MOS (ERNANI et al., 2006). Esta característica faz com que o NH_4^+ e NO_3^- sejam pouco adsorvidos aos colóides ou facilmente trocado por qualquer outro cátion ou ânion disponível na solução pelo mesmo sítio de adsorção, permanecendo em sua maior parte na fase líquida, sendo ambas as formas bastante móveis no solo (ALCÂNTARA; CAMARGO, 2010; GROHSKOPF et al., 2016).

Por isso, o NH_4^+ e NO_3^- prevalecem quase na sua totalidade disponíveis na solução do solo, tanto em solos de características arenosas quanto argilosas. A carga líquida do solo positiva ou negativa para estas formas de N é pouco expressiva, pois, será um elemento pouco adsorvido. No Brasil, os solos com presença de cargas são predominantemente de alto grau de intemperismo, em geral de caráter oxidico e de cargas variáveis, onde a pequena quantidade de cargas (CUNHA et al., 2014) permite pouca interação do N inorgânico com a fase mineral do solo tornando-o pouco adsorvido (ALCÂNTARA; CAMARGO, 2010). Portanto, há a necessidade da adubação frequente e com altas doses nos sistemas de produção agrícolas para manter ou aumentar os níveis de produtividade (MÜLLER et al., 2011; SPARGO et al., 2016).

Existem diversos tipos de tecnologias de fertilizantes nitrogenados disponíveis para uso na agricultura, e para a eficiência de uso destes fertilizantes o mais importante é o manejo no sistema de produção agrícola pela aplicação da fonte certa, na dose certa, na época certa e no lugar certo (BRUULSEMA; FIXEN; SULEWSKI, 2013). A adoção de práticas eficientes na adubação nitrogenada com base no conhecimento da dinâmica do N no solo é a garantia de maior retorno econômico e a sustentabilidade do setor, em virtude das inúmeras reações e perdas que o N

proveniente dos fertilizantes está sujeito no solo (ZHANG et al., 2011; CORRÊA et al., 2016).

2.2.2 Fósforo

O fósforo (P) é um elemento essencial para todas as espécies de plantas, tendo importante função em diversos processos, como: fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia, divisão e crescimento de células, dentre vários outros processos bioquímicos e metabólicos (EPSTEIN; BLOOM, 2006). A principal forma de P absorvida pelas plantas é a de H_2PO_4^- (EPSTEIN; BLOOM, 2006), forma mais comum de P encontrada nos solos devido a faixa de pH (4,0 a 7,5).

Na planta o mecanismo de absorção é ativo, ou seja, com gasto de energia, por meio de carreadores e canais específicos nas raízes das plantas, absorvendo em geral baixas quantidades deste elemento, variando conforme espécie vegetal (TAIZ; ZEIGER, 2013). No xilema e no floema o P é bastante móvel, sendo facilmente e rapidamente distribuído pela planta nas formas de H_2PO_4^- , ésteres simples de fosfatos, fosforil-colina e ATP (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Na planta o P tem importância pela formação de carboidratos, fosfolipídeos, ATP, ADP, DNA, RNA e ácido fítico (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Devido a sua importância na síntese de proteínas, carboidratos e lipídeos, sua deficiência na planta se torna um grande limitante do crescimento e desenvolvimento vegetal.

No solo a dinâmica do P está associada a fatores diversos que controlam a atividade dos microrganismos através dos processos de imobilização e mineralização e, as propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKY, 2008; MARTINAZZO et al., 2007). Os solos altamente intemperizados de carga variável são naturalmente deficientes em fósforo (P) e apresentam alta retenção deste nutriente em formas pouco disponíveis às plantas (FERNANDES et al., 2015; BORTOLON et al., 2016), tornando-o um dos principais fatores limitantes na produção agrícola.

Nestes solos ocorre o predomínio de P inorgânico ligado à fração mineral com alta energia de ligação e as formas orgânicas física e quimicamente estabilizadas no complexo argilo-metal-húmus (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKY, 2008; SOUZA et al., 2014). E, de acordo com grau de labilidade que estes compostos formam com os colóides do solo, são classificados como fosfatos lábeis e não-lábeis.

O P considerado na fração lábil é representado pelos compostos fosfatados com capacidade de repor rapidamente a fase líquida na solução do solo (SHEN et al., 2014). Estas formas de P no solo dependem do grau de intemperização do solo, da textura, da mineralogia, da matéria orgânica, da atividade biológica, e das características das interações físico-químico-biológicas (ARAI; SPARKS, 2007; SANTOS; GATIBONI; KAMINSKY, 2008).

Assim, os processos químicos e biológicos transformam os fosfatos de origem natural em formas orgânicas e inorgânicas estáveis, transferindo o P no ambiente em diferentes compartimentos (precipitados com ferro, cálcio, alumínio, adsorvido aos óxidos na fração argila, em solução, constituindo compostos insolúveis ou em formas orgânicas) (GATIBONI et al., 2008; BOLAN et al., 2013; SHEN et al., 2014).

No solo o P é dividido entre o P inorgânico (Pi) e o P orgânico (Po). O grupo do Pi representa de 35 a 70 % do P total, sendo dividido entre o P dos minerais primários proveniente do material de origem e o P adsorvido aos minerais secundários da fração argila (2:1, 1:1 e principalmente formas cristalinas de óxidos de Fe e Al) (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKY, 2008; BARROW, 2015). Esta forma de P é um dos principais complexos, pela formação de compostos com diferentes graus de labilidade que normalmente retêm fortemente o P (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKY, 2008).

Nos solos de alto grau de intemperismo a adsorção do P ocorre, principalmente, nas formas de baixa cristalinidade, como por exemplo a hematita (óxido de Fe), goethita (oxihidróxido de Fe) e gibbsita (hidróxido de Al) de maior abundância nos solos brasileiros (CUNHA et al., 2014) e, em menores proporções na caulinita nas cargas de superfície dependentes. Adsorção nestes minerais do solo ocorre pela troca do fosfato com os grupos OH e OH_2^+ do metal da estrutura do mineral, fenômeno chamado de troca de ligantes, formando ligações do tipo monodentadas, bidentadas e binucleadas (BOLAN et al., 2013; SHEN et al., 2014).

A energia do complexo covalente segue a seguinte ordem de grandeza dos compostos formados monodentados>bidentados>binucleados e a dessorção do fosfato aumenta na ordem inversa (BARROW, 2015). Nestas ligações aos óxidos de Fe e Al de caráter covalente, a carga elétrica líquida do solo, não impede a efetivação da ligação, pois ocorre a troca de ligantes, mas pode dificultá-la momentaneamente no caso de potencial mais eletronegativo (LUENGO et al., 2006; SHUAI; ZINATI, 2009). Com o avançar do tempo, pode ocorrer no P adsorvidos aos colóides do solo

a formação de compostos binucleados ou a penetração nas imperfeições do mineral cristalizado (BOLAN et al., 2013; BARROW, 2015).

Além da adsorção química, ocorre também no solo a ligação do P na forma de precipitados, principalmente, com os cátions de Ca^{+2} e Al^{+3} , os quais são influenciados pelo pH do solo ou pela concentração destes elementos em formas livres (disponíveis). Em condições de baixo pH do solo (<5,5) aumenta diretamente a atividade do Al^{+3} em solução formando par iônico com o ortofosfato disponível (SHEN et al., 2014). Com o aumento da concentração de OH^- pela elevação do pH do solo, ocorre a dissolução do precipitado formado, ou, o fosfato ligado aos colóides pode migrar da fase sólida para a solução, pois o OH^- compete mais fortemente que o fosfato por estes sítios de adsorção (SHEN et al., 2014). Ou, nas condições de pH elevado (>6,5) normalmente pela prática da calagem, o ortofosfato forma precipitado pela formação de par iônico com o Ca^{+2} disponível, sendo a dissolução do composto formado em valores de pH menores do que 6,5 (SHEN et al., 2014).

Outro grupo no solo é o do P orgânico (Po) originário dos resíduos vegetais adicionados ao sistema e da biomassa microbiana, podendo esta fração de P representar de 5 a 80% do P total (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKY, 2008). A maior parte das formas de Po ainda não foram identificadas pela ciência, sendo as principais formas identificadas as de: fosfatos de inositol com maior representatividade (10 a 80% do Po total), fosfolipídeos, ácidos nucléicos e os ésteresfosfatos (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKY, 2008). A estabilidade destes compostos depende da interação com a fração mineral do solo e da sua natureza química, sendo os fosfatos de inositol com alta energia das ligações estruturais e alta carga residual, o que facilita a sua interação com os colóides do solo e dificulta o ataque por microrganismos e sua disponibilidade nas plantas (MORAES; GATIBONI, 2015).

Em virtude das complexas reações que o P sofre no solo ele é um elemento pouco disponível às plantas e pouco móvel no solo se movendo pela água de difusão, pelas características de sua forte interação aos colóides do solo, acumulando normalmente nas camadas superficiais do solo (BARBER, 1995; OLIVEIRA et al., 2014).

Dependendo do sistema de manejo agrícola adotado e das características mineralógicas do solo, as formas de P de P_i ou P_o podem ser fontes ou dreno para a fase líquida na solução do solo (GATIBONI et al., 2008). Em sistemas, onde não ocorre a adição de P no solo, a disponibilidade deste elemento depende

exclusivamente da ciclagem das formas orgânicas (OLIVEIRA et al., 2014). Já, em solos caracterizados por um menor grau de intemperismo ou adubados, a maior parte do P é proveniente dos complexos inorgânicos formados na forma lábil, enquanto, em solo de maior grau de intemperismo o P disponível depende dos complexos de menor e maior labilidade das formas de Pi e Po (GATIBONI et al., 2008).

A adição de fertilizantes fosfatados no solo promove o acúmulo de P tanto em formas de Pi quanto de Po de diferentes graus de complexidade (GATIBONI et al., 2008). Porém, a forma de Pi é mais pronunciada inicialmente, enquanto, a forma de Po depende das biotransformações no sistema solo-planta aumentando com o passar do tempo (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKY, 2008). Inicialmente, o P proveniente dos fertilizantes é adsorvido aos sítios insaturados de menor labilidade, sendo posteriormente após a saturação dos sítios mais ávidos, o P remanescente distribuído em formas de P de menor energia e maior disponibilidade (BARROW, 2015; BOLAN et al., 2013; SHEN et al., 2014).

Assim, as frações de P em formas mais lábeis podem atuar como fonte ou dreno do P disponível quando a quantidade de P adicionada via fertilizantes é maior do que a quantidade exportada pelo sistema, sendo o remanescente formando compostos mais estáveis (OLIVEIRA et al., 2014). Enquanto, em condições de deficiência do P aportado, abaixo da necessidade requerida pela exportação, as formas de P mais estabilizadas de menor labilidade podem atuar no fornecimento (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKY, 2008; SOUZA et al., 2014).

Portanto, no solo as reações de adsorção e precipitação controlam o destino do P proveniente dos fertilizantes (MCLAUGHLIN et al., 2011; MONTALVO; DEGRYSE; MCLAUGHLIN, 2015) e, em condições de solos de carga variável depende do grau com que o ânion fosfato formam complexos solúveis (SHUAL; ZINATI, 2009; JIANG et al., 2015). Devido a estas inúmeras interações com a fase mineral do solo, a eficiência do P na adubação das culturas depende intimamente da interação solo×fertilizante.

Segundo Degryse e Mclaughlin (2013), apenas uma pequena fração do P aplicado por fertilizantes é absorvida pelas culturas no ano de aplicação e a efetividade do efeito fertilizante residual de P diminui com o tempo. A disponibilização do P mais rápida no sistema solo pelos fertilizantes pode não ser benéfica, pois, aumenta a sua mobilidade pela água de difusão e conseqüentemente a sua maior adsorção aos

colóides do solo pelo maior tempo de contato, formando complexos de menor solubilidade (BOLAN et al., 2013; BARROW, 2015).

Em sistemas de manejo agrícola com o acúmulo de P, tem sido observado que após o esgotamento do P por cultivos sucessivos, que todas as formas de P presentes no solo, de maior ou menor grau de labilidade contribuíram para o fornecimento de P disponível (OLIVEIRA et al., 2014). Já, em sistemas com menor acúmulo de P no solo pela adubação, principalmente, em solos de textura mais arenosa ou siltosa, as formas orgânicas são fontes potenciais de P disponível, comumente com fornecimento abaixo da demanda das plantas (GATIBONI et al., 2008).

Em relação aos fertilizantes minerais, os fertilizantes nas formas orgânicas e organominerais pela presença de compostos orgânicos na sua constituição tem demonstrado uma maior eficiência na disponibilidade do P no sistema solo-planta tanto em solos arenosos quanto argilosos (FERNANDES et al., 2015; CORRÊA et al., 2018b). Ressaltando, que as fontes orgânicas utilizadas introduzem no sistema formas inorgânicas solúveis, inorgânicas na forma de complexos e orgânicas de maior ou menor complexidade (GATIBONI et al., 2008; CASSOL et al., 2012).

Assim, um dos benefícios destes fertilizantes em relação ao mineral está relacionado à eficiência do fósforo (P), onde a presença de compostos orgânicos no fertilizante pode reduzir momentaneamente a fixação desse nutriente aos colóides do solo (CASSOL et al., 2012; SHUAI; ZINATI, 2009), aumentando a difusividade, distribuição no perfil do solo e a disponibilidade para as plantas. A competição entre ânions orgânicos e o fosfato nos sítios de adsorção já é reconhecido na literatura.

Também, pode ser citado os benefícios diretos e indiretos da adição da MO proveniente destas fontes orgânicas na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (MAFRA et al., 2014; CORRÊA et al., 2016). No caso dos fertilizantes organominerais, há poucas informações científicas disponíveis, porém, pesquisas recentes demonstram benefícios nas propriedades químicas do solo e semelhança ou até aumento na produtividade das culturas em comparação as fontes minerais (CORRÊA et al., 2018b), sendo promissoras as perspectivas de seu uso na adubação fosfatada.

Apesar das limitações e dificuldades de quantificação do P no solo, o entendimento e compreensão das suas interações nas diversas classes de solo são importantes e imprescindíveis para otimizar o aproveitamento do P pela fertilização

fosfatada às culturas e o desenvolvimento de fertilizantes mais eficientes para a agricultura.

2.3 Interação entre fósforo e nitrogênio

A inadequada nutrição das plantas ocasiona baixos índices de produtividade, devido a falhas no manejo da adubação ou inexistência de adubação, sendo que para níveis elevados de rendimento as plantas necessitam ter as suas exigências nutricionais plenamente satisfeitas e implicam em grande extração de nutrientes (FAGERIA; BALIGAR, 2014; LACERDA et al., 2015).

Na adubação das culturas ocorre o fornecimento do P e do N muitas vezes em conjunto no fertilizante ou no mesmo momento pela aplicação localizada no solo. Assim, a eficiência dos fertilizantes organominerais pode também estar associada às doses de interação destes elementos nos formulados, interferindo na dinâmica destes nutrientes no solo e na nutrição das plantas.

A maioria dos trabalhos científicos são focados no uso destes elementos em separado pelos fertilizantes na adubação, sendo escassos os trabalhos na avaliação da interação entre fósforo e nitrogênio (P×N). Em sistemas de produção agrícolas intensivos é importante garantir a otimização do fornecimento destes nutrientes “chave” simultaneamente na adubação das culturas. Trabalhos como os de Harpole et al. (2011) e Elser et al. (2007) demonstram que a adição simultânea de ambos os nutrientes promove uma resposta muito maior do que ambos fornecidos isoladamente às plantas nos mais variados ambientes e, estes dependem da ordem em que são adicionados.

O N é o nutriente mineral exigido em maiores concentrações pelas plantas, sendo sua forma e concentração no solo um fator determinante na produtividade das plantas e no rendimento dos sistemas agrícolas de cultivo (GROOT et al., 2003; FAGERIA; BALIGAR, 2014). Em seguida, o fósforo frequentemente é o segundo nutriente mais limitante nas produtividades agrícolas (GROOT et al., 2003; SETIYONO et al., 2010). Sabe-se que deficiência de P no solo ocasiona alterações na absorção e assimilação do N pelas plantas (AGREN; WETTERSTEDT, BILLBERGE, 2012), entretanto, estas interações no solo e na planta ainda são pouco conhecidas pela ciência.

Independentemente da fonte de fertilizante (mineral, orgânico ou organomineral), o P e o N são rapidamente transformados em formas inorgânicas na sua reação no solo, sendo o P transformado à H_2PO_4^- ou HPO_4^- dependendo do pH do meio e, o N em formas de NH_4^+ e NO_3^- . Devido a isto, estes elementos estão sujeitos aos diversos processos e reações inerentes a dinâmica individual de cada no sistema solo-planta.

A disponibilidade de P no solo afeta a dinâmica do N, pois, o ciclo do N está fortemente ligado ao ciclo do P (GROOT et al., 2003). Entretanto, há uma maior atenção à dinâmica da disponibilidade de N como um fator limitante nos ecossistemas, em comparação aos poucos esforços sobre o efeito da dinâmica da disponibilidade de P (BINKLEY; MATSON, 1983; CHEN et al., 2017). A resposta do P ou sua adição no solo e o seu respectivo efeito sobre dinâmica do N são ainda incipientes e mal compreendidos, porém, têm demonstrado indícios de que há interação entre estes elementos em suas dinâmicas no solo (CHEN et al., 2017).

As concentrações dos nutrientes mudam um em relação ao outro no solo e ao longo do crescimento da planta, podendo criar interações entre nutrientes (ZHANG et al., 2007). Estas interações têm como resultado uma combinação sinérgica ou antagônica no solo, afetando direta ou indiretamente diversos processos que interferem na resposta das culturas (ZHANG et al., 2007).

Entretanto, deve-se distinguir sobre os processos de limitação entre eles, tanto o N como o P adicionados de forma simultânea obtêm resposta sobre o desempenho das plantas, e independente da limitação, se obtêm resposta quando o N ou o P são adicionados individualmente, mas a adição simultânea pode ou não somar sobre as respostas individuais de cada elemento (HARPOLE et al., 2011).

Outra afirmação para a interação pode ser pela “Lei do Mínimo” na sua forma simples, onde o nutriente com menor suprimento irá limitar o desenvolvimento e crescimento da planta (AGREN; WETTERSTEDT, BILLBERGE, 2012). Assim, o efeito da interação P×N pode ocorrer em função dos nutrientes individualmente, ou, pela limitação múltipla envolvendo vários recursos e mecanismos simultaneamente (AGREN; WETTERSTEDT, BILLBERGE, 2012). Porém, a complexidade de estudo e desenvolvimento de modelos que expliquem as interações entre estes elementos são difíceis em virtude da complexa e distinta dinâmica de cada elemento, a qual varia em diferentes classes de solo e no ecossistema.

Na planta existem numerosos pontos de interação entre processos metabólicos dependentes de P e N. A resposta do crescimento da planta em condições de limitação de P ocorre de forma diferenciada em relação a limitação de N (GROOT et al., 2003). A explicação para este efeito pode ser em virtude do diferente papel que estes dois elementos exercem nos mecanismos metabólicos das plantas. Este efeito de interação pode também ser diferente de acordo com a classe de solo e suas características, principalmente, mineralógicas com maior efeito sobre a dinâmica do P.

Em condições de P limitante, a concentração de N na planta diminui, existindo várias explicações e hipóteses para este efeito (GROOT et al., 2003). A diminuição da concentração de N pode ser pela divisão da biomassa dos órgãos de alta concentração de N em órgãos de menor concentração (GROOT et al., 2003). Outra explicação pode ser pela diminuição da absorção de N, principalmente, na forma de NO_3^- , devido a uma inibição da absorção radicular nos canais pelo mecanismo ativo ocorrendo o acúmulo do N nas raízes (GNI AZDOWSKA; RYCHTER, 1999).

Também pode ser considerado, que a diminuição da absorção do N pode ocorrer pela diminuição da energia disponível pela menor concentração de ATP pelo menor crescimento vegetal ou pela menor atividade da ATPase (RUFTY et al., 1993; GNI AZDOWSKA; RYCHTER, 2000). Considerando, que o processo de absorção do N é ativo e requer energia metabólica, aproximadamente 25% do gasto energético da planta está relacionado as reações de redução do NO_3^- à NH_4^+ para a sua posterior incorporação em formas orgânicas (EPSTEIN; BLOOM, 2006; TAIZ; ZEIGER, 2013).

Na planta a carência de P pela diminuição da energia metabólica compromete a redistribuição ou remobilização do N na planta (das folhas aos grãos ou frutos), principalmente, na fase reprodutiva e de enchimento de frutos e grãos (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Na incapacidade da planta em redistribuir e atender a demanda de N nestas fases o desenvolvimento reprodutivo fica comprometido, podendo ocorrer a não formação dos grãos e frutos. Com o suprimento de N via raízes limitado para atender a demanda da planta, o pouco N das folhas e do caule é direcionado prioritariamente ao enchimento de grãos e frutos (principais drenos nas plantas), levando a senescência da planta (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Outro impacto negativo da deficiência de P é em plantas que dependem da fixação biológica como as leguminosas. A redução do N_2 atmosférico pelas bactérias em formas assimiláveis às plantas ocorre nos nódulos, que são processos que

demandam grande quantidade de energia, sendo dependente da disponibilidade de ATP (HOULTON et al., 2008; KELLER et al., 2013). Nesta situação, ocorre redução nos nódulos vegetais e diminuição no crescimento do hospedeiro pela redução do processo de fixação (NASTO et al., 2014).

Entretanto, os processos que ocorrem nesta situação de limitação de P sobre o processo de fixação são ainda incertos. Alguns trabalhos sugerem que a deficiência de P tem efeito direto no metabolismo dos nódulos e na atividade da enzima nitrato redutase, outros, citam que ocorre diminuição na síntese de carboidratos para os nódulos no aparato fotossintético da planta (HOULTON et al., 2008; BARRON; PURVES; HEDIN, 2011).

Desta forma, a fixação biológica do N não é favorecida em solos com deficiência no suprimento de P, pois, o processo simbiótico de fixação de N implica em um alto gasto de P (GUOCHEN et al., 2017). Entretanto, as simbioses da planta com as bactérias fixadoras de N são abundantes em solos intemperizados com baixo teor de P disponível ao sistema que normalmente limitam a produtividade das plantas, sendo este um dos paradoxos da fixação de N (GUOCHEN et al., 2017; HEDIN et al., 2009).

Nestes solos deficientes o P da fração orgânica pode representar a principal fonte de ortofosfato para absorção pelas plantas, principalmente, pela atividade da enzima fosfatase (GATIBONI et al., 2008). A maior atividade da fosfatase nas raízes ou no solo favorecem espécies fixadoras de N em detrimento as não fixadoras em sistemas de baixo suprimento de P (GUOCHEN et al., 2017). Entretanto, este efeito da fosfatase sobre a fixação do N ainda é difícil de ser estabelecida.

Ressaltando, que as espécies de plantas fixadoras podem regular a fixação de N quando o suprimento de N do solo não é limitante, podendo também, explicar a persistências destas espécies de plantas em solos deficientes em P (HEDIN et al., 2009). Há efeito de interação P×N no solo sobre o processo de simbiose para fixação do N, porém, os mecanismos envolvidos nesta interação não são completamente esclarecidos pela ciência.

Em condições de níveis adequados ou altos de P na planta ocorre aumento da absorção e acúmulo de N, enquanto que, o incremento da dose de N estimula a absorção de P (AGREN; WETTERSTEDT, BILLBERGE, 2012). Portanto, o N e o P interagem de forma sinérgica, em que ambos os nutrientes em doses adequadas promovem aumentos na produção vegetal maiores do que os obtidos com a aplicação

de cada nutriente isoladamente, sendo a interação controlada principalmente pelo P em detrimento ao N (SATTARI et al., 2014, FAGERIA; BALIGAR, 2014).

Como o N está ligado aos componentes estruturais e regula diversos processos nas plantas, sua deficiência acarreta na redução do crescimento/desenvolvimento das plantas, o que reduz ou limita a absorção de P pela menor demanda deste elemento (GROOT et al., 2003). Portanto, o N atuaria na regulação da quantidade ou demanda de P que será absorvida pelas plantas. A produção de matéria seca pelas plantas está diretamente relacionada ao N, quanto maior a adubação nitrogenada no solo, maior será a demanda de P para que ocorra o desenvolvimento da planta.

Portanto, em solos de alto intemperismo, de caráter oxidico, a interação P×N na absorção pela planta é regulada, principalmente, pelo P. A maior importância do P na relação de interação é devido à baixa disponibilidade natural e a forte interação deste elemento aos colóides minerais do solo, que o tornam um elemento pouco disponível e móvel no perfil do solo, atingindo o caráter de deficiência mais facilmente na planta quando comparado ao N (BOLAN et al., 2013; FERNANDES et al., 2015; BARROW, 2015).

Diferentemente do P, para o N as suas principais formas no solo sofrem menor interação aos colóides do solo, sendo um elemento facilmente trocável e bastante disponível no sistema solo-planta (ALCÂNTARA; CAMARGO, 2010; ERNANI et al., 2006). Ambos os nutrientes influenciam nas suas interações com a planta, sendo estas interações regulados pela disponibilidade de cada elemento no solo. Entretanto, as diferenças entre os fertilizantes orgânicos, minerais e organominerais na interação P×N ainda permanecem desconhecidos e não estudados.

O desequilíbrio no fornecimento de P e N para a demanda nutricional de uma cultura agrícola pode afetar crescimento e desenvolvimento vegetal, aumento de distúrbios nutricionais e proporcionar um maior risco ambiental pelo uso inadequado destes nutrientes simultaneamente no solo. Desta forma, o conhecimento da dinâmica da interação P×N no sistema solo-planta é de fundamental importância para o manejo eficiente de uso simultâneo destes nutrientes na adubação e para o desenvolvimento de novas tecnologias de fertilizantes com base no princípio da sustentabilidade.

3 HIPÓTESES

1. Diferentes teores de fósforo (P) e nitrogênio (N) na produção de fertilizantes organominerais promovem efeito de interação entre estes elementos no solo e na nutrição das plantas.
2. Os diferentes teores de P e N em interação no fertilizante organomineral promovem alterações nos atributos na região do solo ao redor do grânulo dos fertilizantes, e interferem na mobilidade e disponibilidade destes nutrientes em comparação as fontes minerais solúveis de ureia e superfosfato triplo.

4 OBJETIVO

O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da interação entre P e N a partir de diferentes teores destes elementos presentes em fertilizante organomineral a base de cama de aves na fertilidade do solo e na nutrição das plantas de milho em Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf).

4.1 Objetivos específicos

1. Avaliar a interação de diferentes teores P e N em fertilizante organomineral produzidos a base de cama de aves na dinâmica destes nutrientes no solo e na nutrição das plantas milho em um LVdf.
2. Avaliar a mobilidade do N inorgânico na forma de amônio e nitrato na região do solo ao redor dos grânulos em um LVdf em resposta a aplicação de fertilizante organomineral produzido a base de cama de aves com diferentes teores de P em interação.
3. Avaliar a mobilidade e disponibilidade do P em um LVdf na região ao redor dos grânulos em resposta a aplicação de fertilizante organomineral produzido a base de cama de aves com diferentes teores de N em interação.

CAPÍTULO 1

MOBILIDADE DO NITROGÊNIO NO SOLO EM INTERAÇÃO COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO NO FERTILIZANTE ORGANOMINERAL

RESUMO

A mobilidade do nitrogênio (N) inorgânico em resposta à aplicação de fertilizantes organominerais em interação com o fósforo (P) é alterada ao redor dos grânulos em solos de carga variável. O objetivo do trabalho foi avaliar a mobilidade do N inorgânico na forma de amônio (N-NH_4^+) e nitrato (N-NO_3^-) em Latossolo Vermelho Distroférico em resposta a diferentes concentrações de P em fertilizantes organominerais a base de cama de aves. O experimento de incubação em placas de petri foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com seis repetições. Os tratamentos foram constituídos de oito doses de P (0; 1,3; 1,8; 2,5; 3,5; 5 e 10 mg/placa) presentes no fertilizante organomineral, além dos controles sem adubação e ureia (sem P), sendo a dose de interação de N em todos os fertilizantes fixada em 5 mg/placa de N total. Para as análises de N foram amostrados nas placas de petri, o solo em anéis concêntricos em quatro diferentes distâncias a partir do ponto central de deposição dos fertilizantes (0–7,75; 7,76–13,5; 13,51–25,5; e 25,51–43 mm) em cinco tempos de incubação (7, 14, 21, 28 e 35 dias após a aplicação dos fertilizantes). O teor de fósforo no fertilizante organomineral e a dose aplicada interferiu na disponibilidade e na mobilidade do N-NH_4^+ e do N-NO_3^- , e nos processos de imobilização e nitrificação, com comportamento distinto à ureia na região do solo ao redor dos grânulos dos fertilizantes. Até os 21 dias após a aplicação dos fertilizantes houve predomínio de nitrogênio mineral na forma de N-NH_4^+ com deslocamento até a seção 2 (7,76–13,5 mm), enquanto, a forma de N-NO_3^- teve maior proporção a partir dos 28 dias e apresentou mobilidade até a seção 4 (25,51–43 mm). A maior disponibilidade de N mineral e deslocamento de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no solo ocorre nos tratamentos com ureia e organomineral na dose de interação de 0,7 mg/placa, enquanto, os menores teores são demonstrados em formulações intermediárias de organomineral nas doses de 2,5, 3,8 e 5 mg/placa de P.

Palavras-chave: cama de aves, relação, deslocamento, nitrogênio mineral.

NITROGEN MOBILITY INTO THE SOIL IN INTERACTION WITH DIFFERENT PHOSPHORUS CONCENTRATION IN ORGANOMINERAL FERTILIZER

ABSTRACT

The mobility of inorganic nitrogen (N) in response to application of organomineral fertilizers in interaction of phosphorus (P) is changed around the granules in variable charge soils. The aim of this research was to evaluate the mobility of inorganic N in the form of ammonium ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrate ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) in a Typic Hapludox (Oxisol) in response to phosphorus (P) different concentrations in organomineral fertilizers. Incubation experiment in petri dishes was carried out in a completely randomized design, with six replications. Treatments were consisted of eight P doses (0; 0,7; 1,3; 1,8; 2,5; 3,5; 5 and 10 mg/dishes) present in organomineral fertilizers, besides the control (unfertilized) and urea (without P), with the N dose interaction in all fertilizers being fixed in 5 mg/dishes of total N. For the N analysis were sampled in petri dishes, the soil in concentric cylinders in four different distances from the central deposition point of fertilizers (0–7,75; 7,76–13,5; 13,51–25,5; and 25,51–43 mm) in five times of incubation (7, 14, 21, 28 and 35 days after fertilizer application). The P content in organomineral fertilizer and the doses applied interferes in the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ availability and displacement, and in the process of immobilization and nitrification, with different behavior to urea in the soil region around the fertilizers granules. Up to 21 days after fertilizers application there are predominance of N in the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ form with displacement up to section 2 (7,76–13,5 mm), while, the $\text{NO}_3^-\text{-N}$ form had a higher proportion from 28 days and shown mobility up to section 4 (25,51–43 mm). The higher availability of mineral N and displacement of mineral N of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in soil occurs in the treatments with urea and organomineral in the P doses interaction of 0,7 mg/dishes, whereas, the lower contents are demonstrated in intermediate formulations in interactions doses of 2,5, 3,5 e 5 mg/dishes of P.

Keywords: poultry litter, relation, displacement, mineral nitrogen.

5.1 Introdução

O nitrogênio (N) é um dos principais nutrientes na manutenção e incremento de produtividade na maioria das culturas agrícolas. No solo a eficiência do N proveniente dos fertilizantes nitrogenados está relacionada a processos diversos como: dessorção, adsorção, lixiviação, volatilização, nitrificação, desnitrificação, imobilização e mineralização, que geralmente são mediados por microrganismos e influenciados por fatores climáticos (MÜLLER et al., 2011; ZHANG et al., 2011).

O N não faz parte dos constituintes minerais do solo se apresentando, em sua maior parte, como constituinte da matéria orgânica do solo (MOS), a qual não possui sincronismo entre a liberação destes compostos orgânicos e a demanda de N pelas culturas (GROHSKOPF et al., 2015; PAUNGFOO-LONHIENNE et al., 2012). Em solos intemperizados de caráter oxidico e carga variável, a pequena quantidade de cargas (CUNHA et al., 2014) permite pouca interação do N inorgânico com a fase mineral do solo tornando-o pouco adsorvido (ALCÂNTARA; CAMARGO, 2010) e, portanto, há a necessidade da adubação frequente e com altas doses nos sistemas de produção agrícolas (ROSOLEM; LI; GARCIA, 2016; SPARGO et al., 2016).

O amônio ($N-NH_4^+$) e o nitrato ($N-NO_3^-$) são as principais formas de nitrogênio absorvidos pelas plantas. No solo estes íons formam ligações de baixa energia de caráter eletrostático nas cargas de superfície dos colóides, tanto nos argilominerais e óxidos como na MOS (ALCÂNTARA; CAMARGO, 2010; ERNANI et al., 2007; GROHSKOPF et al., 2016), sendo pouco adsorvidos e permanecendo sua maior parte na fase líquida. Soma-se a este processo a rápida transformação do $N-NH_4^+$ à $N-NO_3^-$, em virtude do processo de nitrificação em ambiente oxidante (PAYET et al., 2009, ZHANG et al., 2011), a qual pode ser influenciada pelo tipo de fertilizante aplicado no solo.

A variação no potencial elétrico dos colóides em solos dependentes do pH, influencia a disponibilidade e a mobilidade das formas de N mineral de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ (SALAZAR-CAMACHO; VILLALOBOS, 2010; YANG et al., 2006). Após a incorporação dos fertilizantes nitrogenados, a região do solo ao redor dos grânulos apresenta alta concentração de íons, alterando a dinâmica das cargas pelo aumento da concentração eletrolítica (DEMATTE et al., 2003; ERNANI; RIBEIRO; BAYER, 2006) com reflexo na velocidade das reações do N proveniente dos fertilizantes e sua posterior mobilidade no solo.

Nos fertilizantes formulados em que estão presentes N e P, a presença do P em virtude do processo de troca de ligantes pela adsorção específica a qual independe do potencial elétrico das cargas, aumenta o potencial eletronegativo nas cargas de superfície dos minerais (BOLAN et al., 2013; SHUAI; ZINATTI, 2009) nesta região do solo próxima aos grânulos dos fertilizantes, podendo interferir na disponibilidade e mobilidade do N.

No caso dos fertilizantes organominerais, a presença de MO proveniente dos compostos orgânicos utilizados na produção deste fertilizante podem contribuir com estas alterações eletroquímicas no solo e interferir na dinâmica dos nutrientes (FERNANDES et al., 2015). Porém, os efeitos dos compostos orgânicos presentes no fertilizante organomineral e suas interações no fertilizante e no solo ainda não são compreendidos pela ciência.

A maioria dos trabalhos científicos com a adubação nitrogenada é focada na sua dinâmica no solo como um todo, sendo poucos os trabalhos que demonstram a interação da concentração de P sobre a mobilidade de N a partir de fertilizantes organominerais. Portanto, o conhecimento desta interação pode auxiliar no manejo da adubação nitrogenada e o desenvolvimento de fertilizantes mais eficientes na adubação de culturas.

Desta forma, o objetivo do trabalho foi avaliar a mobilidade do N inorgânico na forma de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ em Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf) em resposta a diferentes concentrações de P em interação presente nos fertilizantes organominerais a base de cama de aves.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Caracterização do solo utilizado no experimento

O experimento foi conduzido em laboratório sob condições controladas na Embrapa Suínos e Aves. O material de solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf) de textura argilosa (SANTOS et al., 2013). O solo foi coletado em Botucatu, SP, em área de vegetação nativa isenta do recebimento de fertilizantes e corretivos, recolhendo-se a camada de 0,0 a 0,2 m de profundidade, sendo posteriormente seco e peneirado em malha 4 mm, retirando-se raízes, palhas

e torrões. Os atributos químicos e físicos do solo estão apresentados na Tabela 1, determinados conforme metodologias descritas por Raij et al. (2001).

Tabela 1. Atributos iniciais da camada de 0,0 a 0,2 m do Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf) utilizado no experimento. Botucatu, SP, 2014.

Solo	pH	PCZ ⁽¹⁾	V	Al	H+Al	Ca	Mg	K	CTC	P _{Mehlich} ⁽²⁾	Argila	MOS	DS
	CaCl ₂		%		-----	mmol _c dm ⁻³	-----			mg dm ⁻³	g kg ⁻¹	g dm ⁻³	g cm ⁻³
LVdf	4,0	4,4	13	17	89	9,0	3,0	0,7	102	5	474	17,0	1,2

Legenda – ⁽¹⁾ Ponto de carga zero; MOS = Matéria Orgânica do Solo; DS= Densidade do Solo; V: Saturação por Bases; Al: alumínio trocável; Ca: cálcio trocável; Mg: magnésio trocável; ⁽²⁾ P: fósforo extraível método de Mehlich; K: potássio extraível.

O LVdf utilizado no experimento tem como material de origem o basalto e caracteriza-se como solo oxídico com predomínio de formas cristalinas dos óxidos de ferro (goethita e hematita), na fração argila predomina a caulinita, seguida de argilominerais do tipo 2:1 com polímeros de hidróxi-Al entre camadas, em proporções menores, ocorrem gibbsita e quartzo (CARVALHO; ESPÍNDOLA; PACCOLA, 1983).

A acidez da amostra de solo foi corrigida para elevar a saturação por bases a 70% utilizando calcário dolomítico (100% de PRNT) na relação 2:1 de CaCO₃ e MgCO₃ conforme método descrito por Raij et al. (1997).

5.2.2 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 5×8+1, com seis repetições. Os tratamentos foram constituídos de oito doses de P (0; 0,7; 1,4; 1,8; 2,5; 3,5; 5 e 10 mg/placa) presentes no fertilizante organomineral, além dos controles sem adubação e ureia (sem P). A dose de interação de N em todos os fertilizantes em teste foi fixada em 5 mg/placa de N total. Para as análises de N foram amostrados anéis concêntricos em quatro diferentes distâncias a partir do ponto central de deposição dos fertilizantes (0–7,75; 7,76–13,5; 13,51–25,5; e 25,51–43 mm) em cinco tempos de incubação (7; 14; 21; 28 e 35 dias após a aplicação dos fertilizantes).

5.2.3 Produção dos fertilizantes

Na produção das formulações do fertilizante organomineral (OM), o material orgânico foi constituído de cama de aves de corte, retirada após seis lotes de criação com 42 dias cada e apresentou 20, 20 e 18 g kg⁻¹ de N, P e K, respectivamente, em sua composição. Para a formulação do OM foi considerado os teores de N e P presentes na cama de aves. Como fonte mineral foram utilizados a ureia (CO(NH₂)₂) (45% de N) e o superfosfato triplo (Ca(H₂PO₄).2H₂O) (46% P₂O₅) na forma em pó. Para a granulação do fertilizante organomineral a cama de aves foi micronizada (moída e peneirada na granulometria de 1,0 mm).

A mistura dos materiais (orgânico e mineral) foi feita de forma homogênea previamente com as quantidades de cada material para compor cada formulação em teste, sendo posteriormente colocado granulador de disco usando 1% de bentonita como adjuvante para dureza ao material e 0,5% de silicato de cálcio neutro como aglomerante para a granulação do fertilizante, conforme demonstrado na tabela 2. Após o processo de granulação, o fertilizante organomineral foi peneirado entre malhas de 1 e 4 mm, sendo separado o material retido entre as duas peneiras, o qual foi seco em estufa de circulação forçada de ar à 65°C por 48 h.

Tabela 2. Característica final dos fertilizantes utilizados e a quantidade aplicada para compor cada tratamento de nitrogênio com as doses de interação de fósforo.

Tratamento Fertilizante	Dose de N (mg/placa)	Dose de P	Formulação (%) N-P-K	Quantidade aplicada (mg/placa)
Ureia	5	0	45-0-0	11,1
OM	5	0,7	15-2-0	34,0
OM	5	1,4	22-6-0	22,8
OM	5	1,8	17-6-0	29,4
OM	5	2,5	12-6-0	41,7
OM	5	3,5	8-6-0	58,8
OM	5	5,0	6-6-0	83,3
OM	5	10,0	3-6-0	166,7

Análise química dos fertilizantes determinada de acordo com metodologia oficial do Ministério da Agricultura (Brasil, 1983).

5.2.4 Experimento placas de petri

O experimento de incubação foi conduzido em placas de petri (8,7 cm de diâmetro e 1,1 cm de altura) de maneira semelhante aos descritos por Lombi et al.

(2004) e Silva et al. (2013). O material de LVdf utilizado foi seco em estufa de circulação forçada de ar à 65°C por 48 h ou até atingir peso constante, sendo posteriormente peneirado (< 2 mm). As placas de petri foram completadas com 80 g de massa de solo seco.

Posteriormente foi adicionada água purificada lentamente por gotejamento com auxílio de pipeta na quantidade necessária para atingir 60% da capacidade de campo do solo em cada placa de petri, visando garantir uma distribuição homogênea da umidade. Em seguida as placas foram fechadas e seladas com filme plástico (Parafilm) e recobertas com papel alumínio para evitar variações na umidade e o contato com a luz, permanecendo incubadas por 15 dias em incubadora com temperatura controlada a 25°C no escuro para estabilização e reação do calcário.

Após este período de pré-incubação as placas de petri foram abertas individualmente somente no momento da aplicação dos grânulos de fertilizante, nas quantidades necessárias de fertilizante para compor cada tratamento, os quais foram alocados exatamente no centro das placas de petri e levemente afundados no solo para que ficassem equidistantes em relação a base e a tampa da placa de petri. Em seguida, as placas de petri foram novamente seladas com filme plástico (Parafilm) e recobertas com papel alumínio e, incubadas em diferentes tempos por até cinco semanas em condições controladas de temperatura e luminosidade como anteriormente descritas.

Os tempos de incubação de cinco semanas foi determinado com base que uma cultura deve absorver neste período uma quantidade de nutrientes suficiente para o seu crescimento e desenvolvimento, principalmente de P, sendo considerado um período crítico e determinante para que uma cultura de interesse agrônomo possa expressar o seu máximo potencial de produção (WILLIAMS, 1948).

No final de cada período de incubação, as placas de petri foram abertas para a amostragem do solo em anéis concêntricos em diferentes distâncias (seções) ao redor do ponto central onde foram depositados os fertilizantes, conforme demonstrado na figura 1. Foram removidas as seções circulares de diâmetro 15,5 mm (0–7,75mm), 27 mm (7,76–13,5 mm), 51 mm (13,51–25,5 mm) e 86 mm (25,51–43 mm), seções 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Na seção central de 15,5 mm o grânulo remanescente do fertilizante foi triturado e homogeneizado junto com o solo removido desta seção.

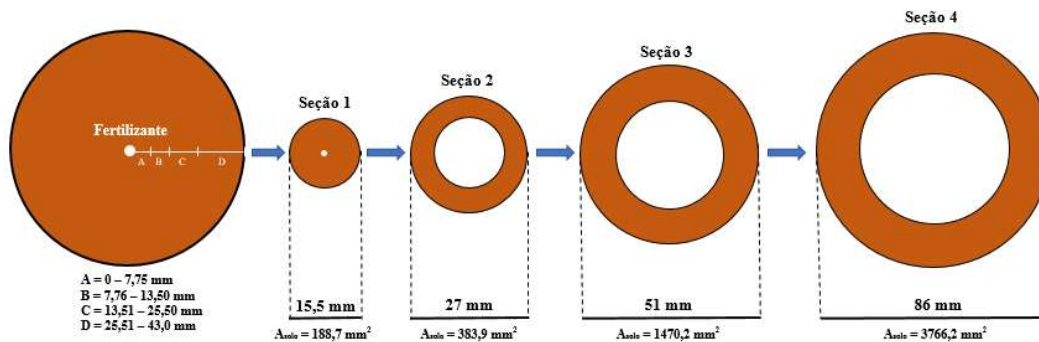


Figura 1. Representação das seções da placa de petri com solo utilizadas para análise no experimento.

5.2.5 Análise química do solo retirado das seções das placas de petri

As amostras retiradas das seções da placa de petri foram homogeneizadas e mantidas úmidas para a determinação do N mineral nas formas de N-NH_4^+ e N-NO_3^- pela extração com $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ na proporção solo:extrator 1:10 (m/v) conforme descrito por Tedesco et al. (1995). O N-NH_4^+ e N-NO_3^- foram determinados por análise por injeção em fluxo (FIA) conforme descrito por Rice et al. (2012). O N-NO_3^- foi determinado em espectrofotômetro em FIA, onde o ânion NO_3^- é reduzido a NO_2^- na presença de cádmio metálico, o qual foi determinado através de uma reação púrpura ($\lambda_{\text{max}} 540 \text{ nm}$) produzido em pH 2,0–2,5 pelo acoplamento entre o sal diazônio derivado da sulfanilamida com o N-(1-naftil)-etilediamina dióxido (NED.2HCl).

O N-NH_4^+ foi determinado na forma de N-NH_3 na alíquota no sistema FIA em espectrofotômetro, baseado na reação do cátion NH_4^+ com o hipoclorito de sódio e em seguida a reação do composto formado com o salicinato de sódio na presença do nitroferricianeto (nitroprussiato), o qual atua como um catalisador em pH elevado. Ocorrendo desta forma, a formação de um complexo de azul-esmeralda ($\lambda_{\text{max}} 630 \text{ nm}$). Para que esta reação ocorra de maneira eficiente foi utilizado no FIA um sistema de aquecimento (65°C) após a mistura dos reagentes com a alíquota da amostra.

5.2.6 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise da homogeneidade da variância e da normalidade. Depois de atendidos os pressupostos paramétricos foi realizada a análise de variância através do teste F, considerando o modelo experimental

inteiramente casualizado para avaliação do efeito de tratamentos. Quando houve diferença significativa, o efeito dos tratamentos e das épocas de coleta (tempos de incubação) foram comparadas pelo teste LSD ($P \leq 0,05$).

5.3 Resultados e discussão

O teor de fósforo (P) presente no fertilizante organomineral (OM) alterou a disponibilidade e mobilidade do amônio no solo ($N-NH_4^+$) (Figura 2). As menores doses de P de 1,3 e 1,8 mg/placa no OM elevaram os teores de $N-NH_4^+$ ao redor do grânulo na seção 1 (0–7,75 mm) com sete dias após a aplicação dos fertilizantes, mesmo quando comparado ao fertilizante sem P na forma ureia e OM com a menor dose de P (0,7 mg/placa), que demonstraram maior mobilidade até as seções 3 e 4 (13,51 – 25,50 e 25,5 – 43,0 mm).

O N na forma de $N-NH_4^+$ é pouco adsorvido aos colóides do solo e quando adsorvido forma fracas ligações de caráter eletrostático (ERNANI et al., 2007), permanecendo em grande parte disponível na solução do solo (ALCÂNTARA; CAMARGO, 2010; WARREN, 2014), estando sua mobilidade e disponibilidade no solo atrelado a velocidade de liberação pelos fertilizantes (GROHSKOPF et al., 2016).

Após 14 dias os maiores teores de $N-NH_4^+$ na seção 1 foram observados nos tratamentos com OM na menor (0,7 mg/placa) ou maior dose de P (10 mg/placa), permitindo inferir que pode estar ocorrendo ainda a disponibilização pela solubilização química ou mineralização destes fertilizantes neste momento. Enquanto, em teores de P iguais ou inferiores a 5 mg/placa presentes no OM permitem maior mobilidade de $N-NH_4^+$ até a seção 2 (7,76–13,5 mm), com destaque para os fertilizantes OM nas doses de 5, 3,5 e 2,5 mg/placa de P (Figura 2).

Aos 21 dias apenas a ureia ($CO(NH_2)_2$) apresentou os maiores teores de $N-NH_4^+$ (Figura 2), entretanto, a maior mobilidade até a seção 2 foi apresentada no tratamento ureia (sem P) e OM na dose de 0,7mg/placa. No OM na menor dose pode estar ocorrendo efeito da atividade da matéria orgânica (MO) de forma mais significativa que as demais formulações, pela maior quantidade de cama de aves utilizado nesta formulação promovendo a mineralização do nitrogênio orgânico, ou, prováveis ligações do $N-NH_4^+$ com as cargas negativas da MO. Nas seções 3 e 4 houve menor mobilidade de todos os fertilizantes, sendo apenas a ureia superior aos demais tratamentos na seção 4.

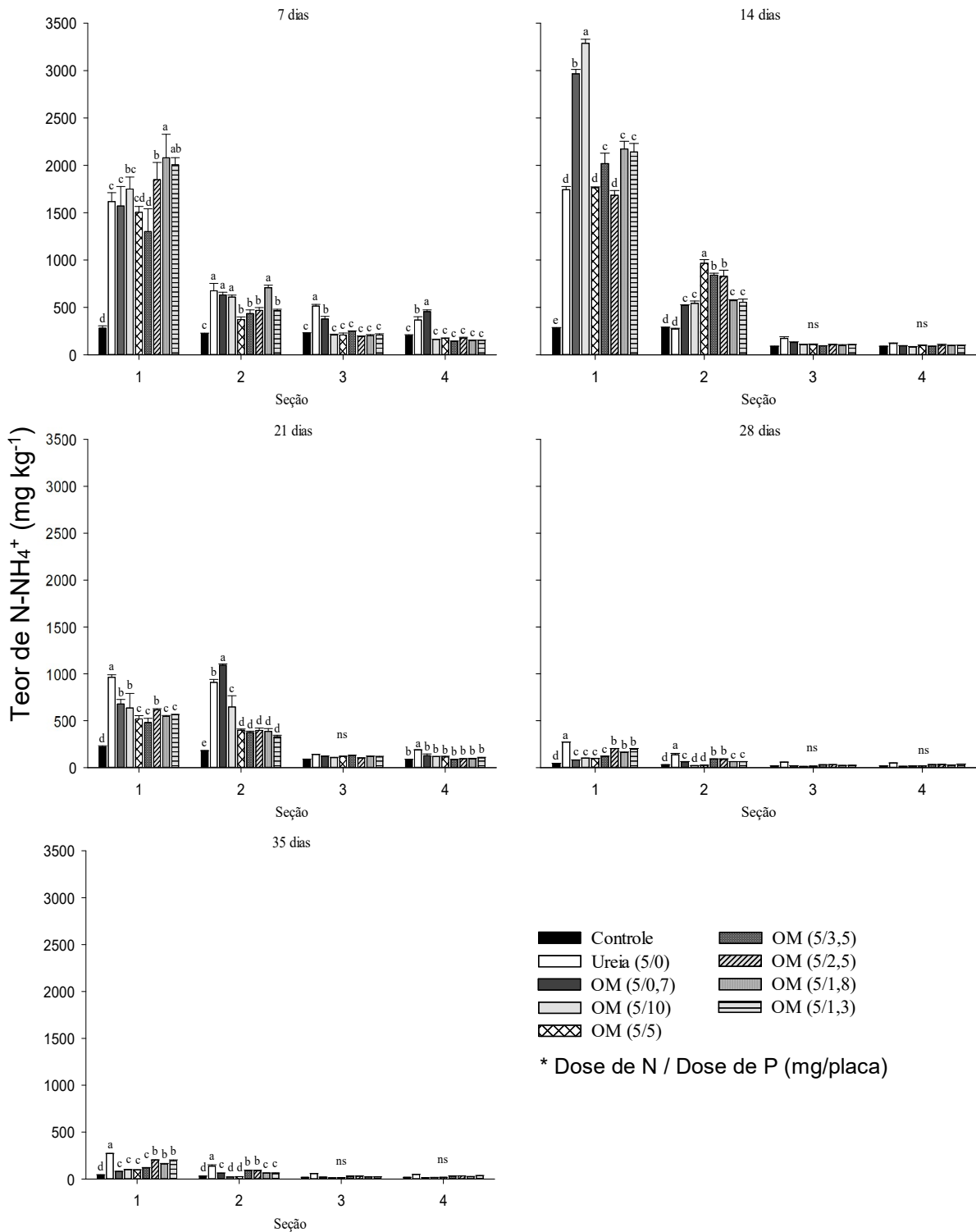


Figura 2. Teor de nitrogênio na forma de amônio ($N-NH_4^+$) em Latossolo Vermelho Distroférico nas seções em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Legenda – Seção 1 = 0 – 7,75 mm; Seção 2 = 7,76 – 13,50 mm; Seção 3 = 13,51 – 25,50 mm; e Seção 4 = 25,51 – 43,0 mm. Barras verticais em cada ponto representam o erro padrão dos valores. Médias com letras distintas diferem pelo teste de LSD ($p \leq 0,05$) dentro de cada seção.

Aos 28 e 35 dias há pouco nitrogênio amoniacal presente no solo em todas as seções, estando apenas a ureia nas seções 1 e 2 com os teores acima dos fertilizantes OM em todas as doses de P de interação (Figura 2). Indicando nas condições deste experimento, que praticamente todo o N-NH_4^+ presente no solo em todos os tratamentos neste período de incubação com fertilizantes sofreu os processos de transformação no solo, principalmente, a nitrificação.

De modo geral, os maiores teores de N-NH_4^+ nos tempos de incubação e seções avaliados ocorreram nos tratamentos com ureia e nos fertilizantes OM nas doses de 10; 2,5; 1,8, 1,3 e 0,7 mg/placa de P (figura 2). Enquanto, os menores teores foram demonstrados em formulações intermediárias de fertilizantes OM nas doses de interação de 5 e 3,5 mg kg^{-1} de P, à exceção dos 14 dias.

Além da dose e teor de P proveniente dos fertilizantes, outra provável fonte de interferência com relação ao N-NH_4^+ foi estabelecida pela quantidade de material orgânico (cama de aves) utilizado na produção do fertilizante OM, sendo o tratamento na menor dose de 0,7 mg/placa de P em contraste com a ureia (Sem P) específico para demonstrar tal eficiência, justificado pela maior mobilidade aos sete dias na seção 4 e maiores teores aos 14 e 21 dias nas seções 1 e 2. A MO e as maiores doses de P pode ter auxiliado na retenção temporária do N-NH_4^+ , pelo aumento do potencial eletronegativo do solo pela troca de ligante do P nos óxidos de Fe e Al presentes no solo e (BOLAN et al., 2013), e no crescimento dos microrganismos imobilizando temporariamente o N-NH_4^+ (MULLER et al., 2011).

A teor de P no fertilizante organomineral (OM) e a quantidade aplicada altera a disponibilidade e mobilidade do nitrato (N-NO_3^-), com os maiores teores a partir de 28 dias em virtude do processo de nitrificação ocorrida dias antes (Figura 3). Durante os dois primeiros tempos de incubação de sete e 14 dias a concentração de N-NO_3^- foi baixa e os maiores teores ocorreram nas menores doses de P em interação de 1,4 e 1,8 mg/placa na seção 1; e há maior mobilidade no tratamento com ureia onde o P não esteve e na menor dose de OM (0,7 mg/placa de P) que alcançaram as seções de 3 e 4 nestes dois períodos avaliados.

Aos 21 dias, embora a concentração de N-NO_3^- ainda seja baixa existe homogeneidade entre os tratamentos em que o P esteve presente no OM nas duas primeiras seções onde há significância, com os maiores teores nos tratamentos com ureia e OM na dose de 0,7 mg/placa na seção 1 e, em OM na dose de 1,8 mg/paca (Figura 3). Até este período de incubação ainda são altos os teores de N-NH_4^+ no solo,

principalmente, nas seções 1 e 2, forma de N pouco adsorvido pelos colóides do solo permanecendo em grande parte disponível na solução do solo, estando sujeito aos processos de transformação por nitrificação e nitratação que são intermediados por microrganismos (GROHSKOPF et al., 2016; ZHANG et al., 2011) e que ocorrem mais intensamente a partir deste tempo nas condições deste experimento.

Aos 28 e 35 dias, períodos em que a concentração de N-NO_3^- é maior no solo em função da nitrificação, houve grandes diferenças entre fertilizantes ficando as maiores evidências representadas em OM na dose de 0,7 mg/placa na seção 1 e na maior dose de 10 mg/placa de P na seção 2 (Figura 3). Este resultado permite inferir que a ausência ou a menor concentração de P no solo em razão da aplicação de fertilizante OM favorece a nitrificação, seja próximo ao grânulo no primeiro caso, ou mobilidade até regiões mais adjacentes em relação ao ponto de deposição dos fertilizantes no solo quando pequenas quantidades de P são adicionadas.

Comparado ao N-NH_4^+ o N-NO_3^- é mais móvel no solo atingindo a seção 3 e 4 aos 28 e 35 dias com homogeneidade entre os tratamentos que receberam adubação nitrogenada em diferentes concentrações de P no grânulo do fertilizante (Figura 3). Em solos de carga variável como o Latossolo Vermelho, o processo da calagem para elevação da saturação por bases e o P dos fertilizantes pelo processo de troca de ligantes aumentam o potencial eletronegativo do solo ($\text{PCZ} = 4,4$) e o espessamento da dupla camada difusa, diminuindo a adsorção do N-NO_3^- e aumentando a sua mobilidade nesta região do solo ao redor do grânulo do fertilizante (ERNANI; RIBEIRO; BAYER, 2006; YANG et al., 2006).

A presença de MO da cama de aves nos fertilizantes pode ter contribuído para elevar o teor de N-NO_3^- no solo a partir de 21 dias, justificado no contraste entre OM na dose de 0,7 mg/placa e a ureia (sem P) nas seções 1 e 2 aos 21 e 35 dias, e também na seção 3 aos 28 dias (Figura 3). Desta forma, pode-se inferir que a MO permitiu elevar o potencial eletronegativo do solo ao redor do grânulo, ou, pelo estímulo a atividade microbiana intensificando o processo de nitrificação, caracterizado pelo maior teor de N-NO_3^- na seção 2 a partir de 21 dias, que por sua vez concilia com o processo de nitrificação aumentando os teores a partir dos 28 dias.

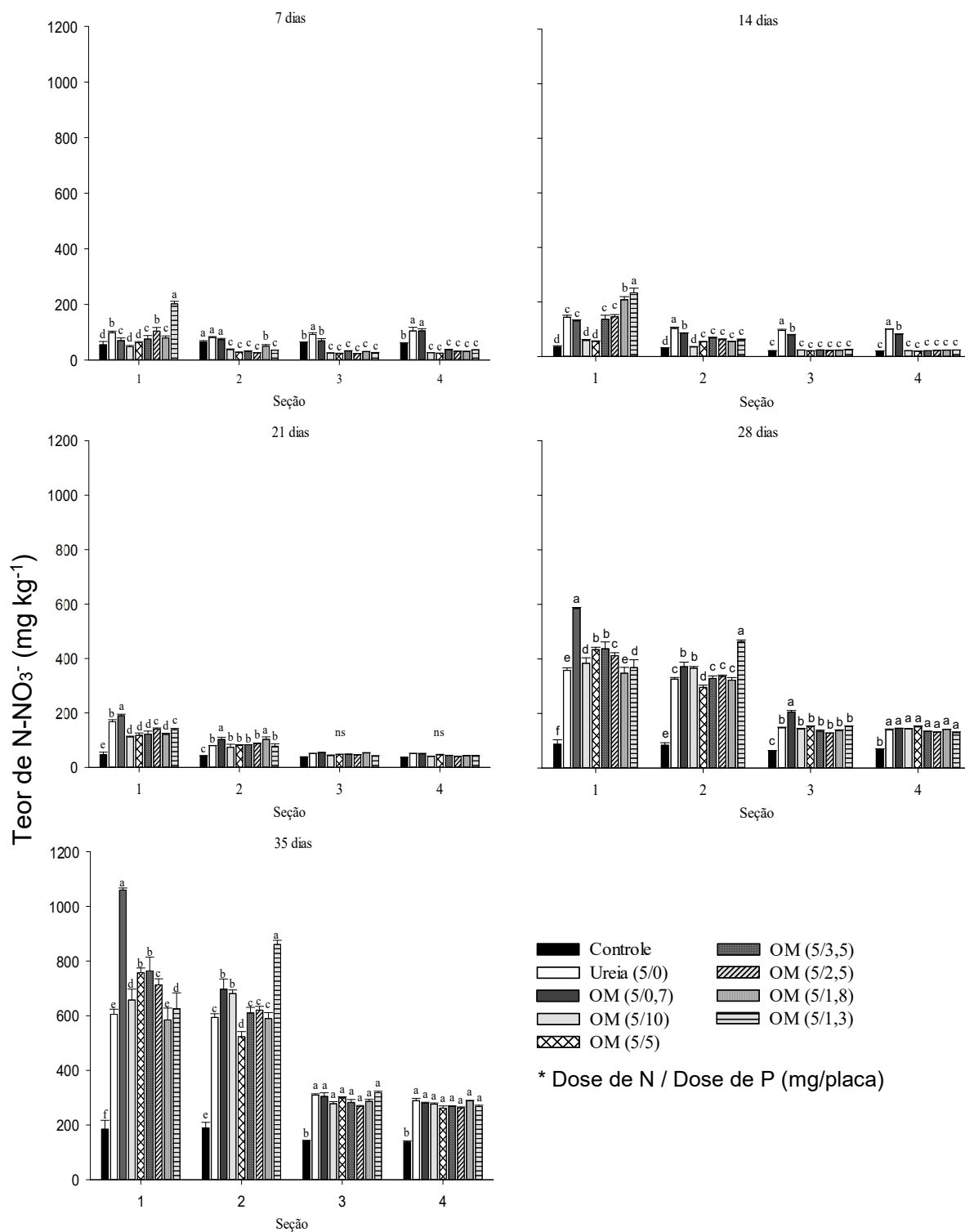


Figura 3. Teor de nitrogênio na forma de nitrato ($N-NO_3^-$) em Latossolo Vermelho Distroférico nas seções em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Legenda – Seção 1 = 0 – 7,75 mm; Seção 2 = 7,76 – 13,50 mm; Seção 3 = 13,51 – 25,50 mm; e Seção 4 = 25,51 – 43,0 mm. Barras verticais em cada ponto representam o erro padrão dos valores. Médias com letras distintas diferem pelo teste de LSD ($p < 0,05$) dentro de cada seção.

Portanto, os maiores teores de N-NO_3^- no tratamento OM na menor dose de P (0,7 mg/placa) em relação à ureia nas seções 2 e 3 nos tempos 21, 28 e 35 dias pode estar também relacionado à redução do ponto de carga zero (PCZ) pelo maior aporte de material orgânico, o qual poderia aumentar a presença de cargas negativas nas adjacências do grânulo e auxiliar na maior mobilidade desta forma de N (Figura 3). Porém, este efeito na geração de cargas negativas é menos significativo do que os efeitos proporcionados pela calagem ou pelo processo de troca de ligantes na adsorção específica do P com os colóides minerais deste solo.

Os compostos orgânicos apresentam alta densidade de cargas e que são dependentes do pH, tendo em média baixos valores de ponto de carga zero (PCZ), apresentando o predomínio de cargas negativas e em quantidades superiores aos minerais de argila do solo (SHUAI; ZINATTI, 2009; ZHU et al., 2017).

Os maiores teores de N mineral total foram observados aos sete e 14 dias após a aplicação dos fertilizantes, com ênfase na seção 1; com deslocamento para seção 2 aos 21 dias; imobilização pelos microrganismos e nitrificação aos 28 dias; e voltando a valores iniciais, agora na forma de N-NO_3^- , com deslocamento até as seções 3 e 4 aos 35 dias (Figura 4).

Aos sete dias os maiores teores N mineral total foram demonstrados nos tratamentos com fertilizantes OM nas doses de interação de 1,3 e 1,8 mg/placa de P na seção 1; nas doses de 10 e 1,8 mg/placa de P em OM na seção 2; e, nas seções 2, 3 e 4 foram destaques os tratamentos ureia (sem P) e OM na dose de 0,7 mg/placa (Figura 4).

Após sete dias os tratamentos que apresentaram os maiores teores de N total disponível foram: OM na dose de interação de 0,7 e 10 mg/placa de P na seção 1, e OM nas doses de 5, 3,5 e 2,5 mg/placa de P na seção 2 aos 14 dias; os tratamentos ureia (sem P) e OM na menor dose de interação de P (0,7 mg placa) nas seções 1 e 2 aos 21 dias; ureia e OM nas doses de 0,7, 2,5 e 1,3 mg/placa de P na seção 1, e o OM na dose de 1,3 mg/placa de P na seção 2 aos 28 dias; e pôr fim ureia e OM na dose de 1,3 mg/placa de P nas seções 1 e 2 e em todos os tratamentos com fertilizantes nas seções 3 e 4 aos 35 dias de incubação (Figura 4).

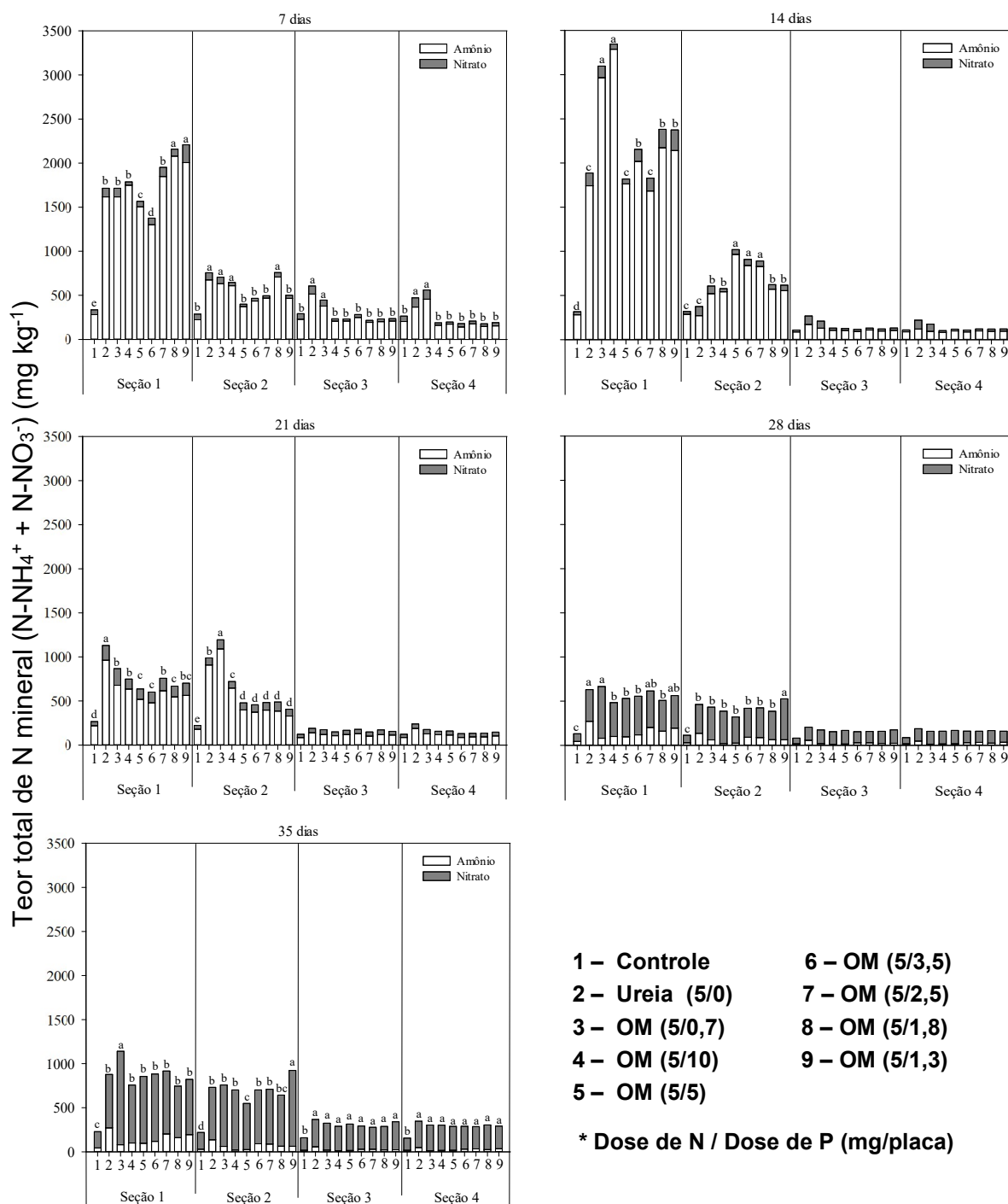


Figura 4. Teor de nitrogênio mineral ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$) em relação ao nitrogênio total em Latossolo Vermelho Distroférico nas seções em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Seção 1 = 0 – 7,75 mm; Seção 2 = 7,76 – 13,50 mm; Seção 3 = 13,51 – 25,50 mm; e Seção 4 = 25,51 – 43,0 mm. Médias com letras distintas diferem pelo teste de LSD ($p \leq 0,05$) dentro de cada seção.

Entre os fertilizantes que apresentaram rápida imobilização de N e posterior nitrificação, vale destacar, os tratamentos sem P (ureia) e com menor concentração de P (0,7 e 1,3 mg/placa) (Figura 4). Inferência que pode ser justificada aos 28 e 35 dias (seções 1 e 2) e permite afirmar que a pequena presença de P e a matéria orgânica presente no fertilizante estimula a maior atividade dos microrganismos nitrificantes.

Na soma dos teores de N mineral nas formas $N-NH_4^+$ ou $N-NO_3^-$, os tratamentos apresentam comportamento distinto para cada fertilizante, em função da concentração e a dose de P em interação (Figura 5). Os maiores teores de $N-NH_4^+$ ocorrem entre os tempos de incubação de 7 e 14 dias, para os fertilizantes organominerais com redução até próximo aos 28 dias de incubação.

Desta forma, os fertilizantes OM disponibilizam o N, mantendo-o na forma $N-NH_4^+$, mais lentamente em relação à ureia até os 14 dias, com destaque para as formulações com as maiores doses de P de 5 e 10 mg/placa (Figura 5). Após 14 dias de incubação os fertilizantes OM permitem maior imobilização em relação ao mineral até os 21 dias. O que pode ser justificada em virtude de os OM apresentarem menores teores de $N-NH_4^+$ e concentrações semelhantes de $N-NO_3^-$, o que permite inferir que neste período ocorre maior imobilização de N pelos microrganismos e, conseqüentemente, explica a nitrificação antecipada destes fertilizantes quando comparados à ureia.

O processo de imobilização do N é temporário no solo e à medida que ocorre a morte destes organismos vivos, o N imobilizado que é incorporado ao citoplasma destes é liberado ao sistema (CREAMER et al., 2015; MARIANO et al., 2016), sofrendo o N os processos e reações no solo, principalmente a nitrificação que ocorre de forma rápida (PAYET et al., 2009, ZHANG et al., 2011).

Pode ser observado que há um ponto de equivalência do nitrogênio mineral no solo (PENM) entre as formas de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ nas suas concentrações no solo, sendo para a ureia o PENM aos 28 dias após de incubação e para os fertilizantes organominerais em todas as doses de interação de P foi em torno dos 26 dias (Figura 5).

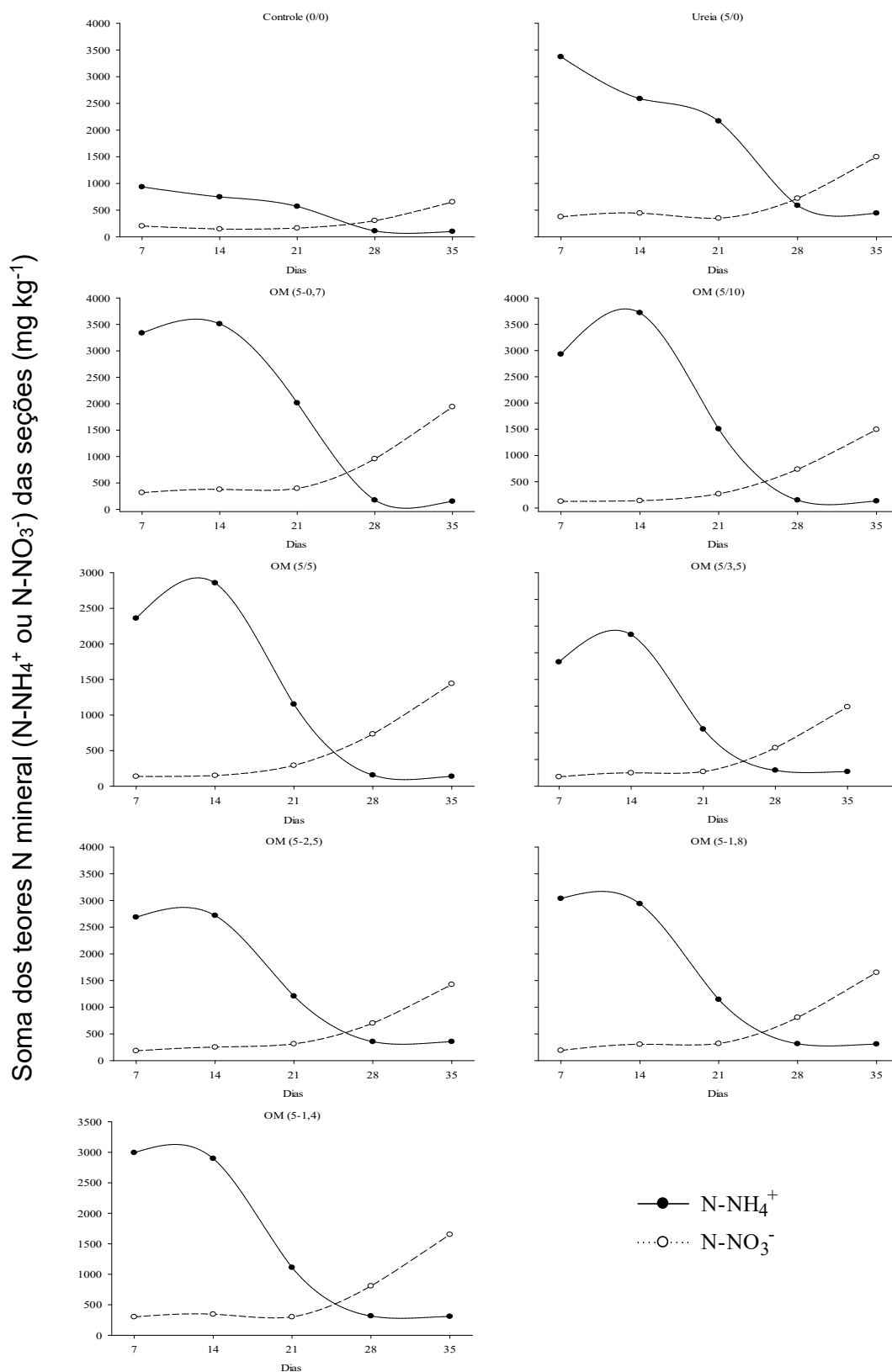


Figura 5. Soma dos teores de nitrogênio mineral (N-NH_4^+ ou N-NO_3^-) em Latossolo Vermelho Distroférico em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Somatório das seções 1 (0 – 7,75 mm), 2 (7,76 – 13,50 mm), 3 (13,51 – 25,50 mm) e 4 (25,51 – 43,0 mm). * N/P = Dose de N / Dose de P (mg/placa).

No caso dos fertilizantes organominerais o teor de P no fertilizante e a dose aplicada altera a sua eficiência quanto aos processos de disponibilidade de N-NH_4^+ , imobilização e a nitrificação. A disponibilização mais lenta do N no solo pode reduzir os processos e reações inerentes ao N e aumentar a sua eficiência na adubação de culturas. A presença de compostos orgânicos na composição dos fertilizantes organominerais pode ter estimulado a retenção temporária do N pela imobilização ou a retenção do N mineral nas suas cargas disponibilizando-o mais lentamente no solo, com ênfase as formulações com maior concentração de P.

5.4 Conclusões

O teor de fósforo no fertilizante organomineral e a dose aplicada interferiu na disponibilidade e na mobilidade do N-NH_4^+ e do N-NO_3^- , e nos processos de imobilização e nitrificação, com comportamento distinto à ureia na região do solo ao redor dos grânulos dos fertilizantes.

Até os 21 dias após a aplicação dos fertilizantes houve predomínio de nitrogênio mineral na forma de N-NH_4^+ com deslocamento mais significativo até a seção 2 (7,76–13,5 mm), enquanto, a forma de N-NO_3^- teve maior proporção a partir dos 28 dias de incubação nas placas de petri apresentou mobilidade até a seção 4 (25,51–43 mm).

A maior disponibilidade de N mineral e deslocamento de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no solo ocorre nos tratamentos com ureia e organomineral na dose de interação de 0,7 mg/placa, enquanto, os menores teores são demonstrados em formulações intermediárias de organomineral nas doses de 2,5, 3,8 e 5 mg/placa de P.

5.5 Referências

ALCÂNTARA, M. A. K.; CAMARGO, O. A. Movimentação de nitrato em horizonte superficial e subsuperficial de Latossolo e Nitossolo com cargas variáveis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v.45, n.1, p.81–88, 2010. DOI: 10.1590/S0100-204X2010000100011

BOLAN, N. et al. Phosphorus–arsenic interactions in variable-charge soils in relation to arsenic mobility and bioavailability. **Science of the Total Environment**, v.463–464, p.1154–1162, 2013. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.04.016

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Análise de corretivos, fertilizantes e inoculantes: métodos oficiais**. Brasília, Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, 1983. 104 p.

CARVALHO, W. A.; ESPÍNDOLA, C. R.; PACCOLA, A. A. **Levantamento de solos da fazenda Lageado**. Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu-SP, 1983. 95p. (Boletim Científico, n.1).

CUNHA, J. C. et al. Quantification of permanent and variable charges in reference soils of the state of pernambuco, brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.38, p.1162–1169, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000400012

CREAMER, C. A. et al. Microbial community structure mediates response of soil C decomposition to litter addition and warming. **Soil Biology & Biochemistry**, v.80, p.175-188, 2015. DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.10.008

DEMATTE, J. A. M. et al. Soil chemical alterations promoted by fertilizer application assessed by spectral reflectance. **Soil Science**, v.168, n.10, p730–747, 2003. DOI: 10.1097/01.ss.0000095146.68539.09

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. F.; S BAYER, C. Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.35, p.889–901, 2006. DOI:10.1081/CSS-120030365

ERNANI, P. R. et al. Downward movement of soil cations in highly weathered soils caused by addition of gypsum. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.37, p.571–586, 2007. DOI: 10.1080/00103620500449443

FERNANDES, D. M. et al. Fósforo na solução do solo em resposta a aplicação de fertilizantes fluidos mineral e organomineral. **Irriga**, v.1, p.14–27, 2015. DOI: 10.15809/irriga.2015v1n1p14

GROHSKOPF, M. A. et al. Organic Nitrogen in a Typic Hapludox Fertilized with Pig Slurry. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.39, n.1, p.127–139, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20150080

GROHSKOPF, M. A. et al. Soil Solution Nutrient Availability, Nutritional Status and Yield of Corn Grown in a Typic Hapludox under Twelve Years of Pig Slurry Fertilizations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.40, e0150341, 2016. DOI: 10.1590/18069657rbc20150341

LOMBI, E. et al. Speciation and distribution of phosphorus in a fertilized soil: A synchrotron-based investigation. **Soil Science Society of America Journal**, v.70, p.2038–2048, 2006. DOI:10.2136/sssaj2006.0051

LOMBI, E. et al. Mobility and Lability of Phosphorus from Granular and Fluid Monoammonium Phosphate Differs in a Calcareous Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.682–689, 2004. DOI: 10.2136/sssaj2004.6820

MARIANO, E. et al. Mineralization and sorption of dissolved organic nitrogen compounds in litter and soil from sugarcane fields. **Soil Biology & Biochemistry**, v.103, p.522–532, 2016. DOI: 10.1016/j.soilbio.2016.10.004

MÜLLER, C. et al. Effects of repeated fertilizer and slurry applications over 38 years on N dynamics in a temperate grassland soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v.43, p.1362–1371, 2011. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.03.014

PAUNGFOO-LONHIENNE, C. et. al. Past, present and future of organic nutrients. **Plant and Soil**, v.359, p.1-18, 2012. DOI 10.1007/s11104-012-1357-6

RAIJ, B. Van. et al. **Recomendação de adubação e calagem para o estado do São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 300p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. Van. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285p.

RICE, E. W. et al. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22.ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2012. 1360p.

ROSOLEM, C. A.; LI, Y.; GARCIA, R. A. Soil carbon as affected by cover crops under no-till under tropical climate. **Soil Use and Management**, v.32, n.4, p.495–503, 2016. DOI: 10.1111/sum.12309

SALAZAR-CAMACHO, C.; VILLALOBOS, M. Goethite surface reactivity: III. Unifying arsenate adsorption behavior through a variable crystal face – Site density model. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.74, p.2257–2280, 2010

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBREAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3.ed. ver. ampl. Brasília,DF: Embrapa, 2013. 353p.

SHUAI, X.; ZINATI, G. Proton charge and adsorption of humic acid and phosphate on goethite. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n.6, p.2013-2020, 2009. DOI:10.2136/sssaj2009.0119

SILVA, R. C. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada**. 2013. 166p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2013.

SPARGO, J. T. et al. Organic Supplemental Nitrogen Sources for Field Corn Production after a Hairy Vetch Cover Crop. **Agronomy Journal**. v.108, p. 1992–2002, 2016. DOI: 10.2134/agronj2015.0485

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 212 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

YANG, J. Y. et al. Effects of pH, organic acids, and inorganic ions on lead desorption from soils. **Environmental Pollution**, v.143, p.9–15, 2006. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.11.010

WARREN, C. R. Organic N molecules in the soil solution: what is known, what is unknown and the path forwards. **Plant and Soil**, v.375, p.1–19, 2014. DOI 10.1007/s11104-013-1939-y

WILLIAMS, R. F. The effect of phosphorus supply on the rates of intake of phosphorus and nitrogen and upon certain aspects of phosphorus metabolism in gramineous plant. **Australian Journal of Scientific Research**, v.1, n.3, p. 333–341, 1948.

ZHANG, J. B. et al. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil nitrogen transformations. **European Journal of Soil Science**, v.63, p.75-85, 2011. doi:10.1111/j.1365-2389.2011.01410.x

ZHU, X. et al. Evaluation of the stability of soil nanoparticles: the effect of natural organic matter in electrolyte solutions. **European Journal of Soil Science**, v.68, 105–114, 2017. DOI: 10.1111/ejss.12402

CAPÍTULO 2

DIFUSÃO DO FÓSFORO EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE NITROGÊNIO

RESUMO

A difusividade do fósforo (P) pode ser alterada pela interação com o nitrogênio (N) no fertilizante organomineral ao redor dos grânulos em solos de carga variável. O objetivo do trabalho foi avaliar a difusão do P em Latossolo Vermelho Distroférico em resposta a diferentes doses de interação de N em fertilizantes organominerais (OM) a base de cama de aves. O experimento de incubação em placas de petri foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com seis repetições. Os tratamentos foram constituídos de oito concentrações de N (0; 2,9; 4,4, 8,8, 11,8, 17,6, 25,0 e 32,3 mg/placa) presentes no fertilizante organomineral, além dos controles sem adubação e superfosfato triplo (SFT- sem N), sendo a dose de P em todos os fertilizantes fixada em 8,8 mg/placa. Para as análises de P foram amostrados nas placas de petri, o solo em anéis concêntricos com diferentes distâncias a partir do ponto central de deposição dos fertilizantes (0-7,75; 7,76-13,5; 13,51-25,5; e 25,51-43 mm) em cinco tempos de incubação (7, 14, 21, 28 e 35 dias após a aplicação dos fertilizantes). A dose de N via fertilizante OM promove alterações químicas na região do solo ao redor dos grânulos dos fertilizantes que influenciam na mobilidade por difusão e na disponibilidade do P. Os maiores teores de P disponível ocorrem com sete dias após a aplicação dos fertilizantes, diminuindo até os 35 dias de incubação, sendo em geral os maiores teores nas seções 1 (0-7,75 mm) e 2 (7,76-13,5 mm) mais próximas ao grânulo dos fertilizantes. O tratamento com SFT (sem N) promoveu maior deslocamento e teor de P disponível, enquanto, uma menor disponibilidade e adsorção do P é demonstrada em OM nas doses de interação de 4,4 e 8,8 mg/placa de N com significativo aumento a partir dos 28 dias.

Palavras-chave: cama de aves, mobilidade, fósforo extraível.

PHOSPHORUS DIFFUSION IN FUNCTION OF ORGANOMINERAL FERTILIZERS APPLICATION WITH DIFFERENT NITROGEN CONCENTRATIONS

ABSTRACT

Phosphorus (P) diffusivity may be altered by the interaction with nitrogen (N) in the organomineral fertilizer around the granules in variable charge soils. The aim of this research was to evaluate the diffusion of P available in a Typic Hapludox (Oxisol) in response to different N doses in interaction in organomineral fertilizers based in poultry litter. Incubation experiment in petri dishes was carried out in a completely randomized design, with six replications. Treatments were consisted of eight concentrations of P (0; 2,9; 4,4, 8,8, 11,8, 17,6, 25,0 e 32,3 mg/dishes) present in organomineral fertilizers in complex form, besides the control (unfertilized) and triple superphosphate (TSP-without N), with the P dose interaction of fertilizers being fixed in 8,8 mg/dishes of total P. For the P analysis were sampled in petri dishes, the soil in concentric cylinders with different distances from the central deposition point of fertilizers (0–7,75; 7,76–13,5; 13,51–25,5; and 25,51–43 mm) in five times of incubation (7, 14, 21, 28 e 35 days after fertilizer application). The N dose by the OM fertilizer promotes chemical changes in the soil region around the fertilizers granules that influence the mobility by diffusion and P availability. The highest content of P available occurred with seven days after fertilizer application, decreasing up to 35 days, being in general the highest contents in sections 1 (0–7,75 mm) and 2 (7,76–13,5 mm) nearest to the fertilizer granule. The TSP treatment (without N) promotes higher displacement and P available content into the soil, while a lower availability and adsorption of P is demonstrated in OM in the interaction doses of 4,4 and 8,8 mg/dishes of with significant increase from 28 days.

Keywords: poultry litter, mobility, extractable phosphorus.

6.1 Introdução

Solos intemperizados de carga variável são naturalmente deficientes em fósforo (P) e apresentam adsorção específica com alta energia de ligação formando vários complexos (ARAI; SPARKS, 2007; SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008; BARROW, 2015), o que o torna pouco móvel e disponível as plantas (FERNANDES et al., 2015; BORTOLON et al., 2016). Nestes solos de caráter oxidico, o P é adsorvido predominantemente nos sesquióxidos de Fe e Al (LUENGO et al., 2006; CUNHA et al., 2014) e em argilominerais como a caulinita nas cargas de superfície dependentes (SHEN et al., 2011).

A mobilidade do P no solo ocorre predominantemente por difusão caracterizado pelo movimento térmico ao acaso, em virtude de um gradiente de concentração na solução, se deslocando a curtas distâncias entre os colóides do solo (BARBER, 1995; LOMBI et al., 2004; DEGRYSE; MCLAUGHLIN, 2013). O conhecimento da dinâmica do P no solo fundamenta a necessidade de otimização quanto ao manejo de práticas eficientes, entre elas, o uso de fertilizantes e sua forma de aplicação para permitir maior disponibilidade ao sistema agrícola de produção.

A eficiência dos fertilizantes depende das interações com o solo e, após a aplicação, as reações de adsorção e precipitação que controlam o destino do P proveniente dos fertilizantes (MCLAUGHLIN et al., 2011; MONTALVO; DEGRYSE; MCLAUGHLIN, 2015), principalmente, a adsorção do ânion fosfato com os grupos funcionais de superfície mineral de argila (JIANG et al., 2015; SHEN et al., 2011) e que dependem do grau com que os íons fosfato formam complexos solúveis (SHUAL; ZINATI, 2009).

No solo, a primeira reação dos fertilizantes é o molhamento do grânulo, predominantemente pelo fluxo capilar de água em direção aos poros dos grânulos, sendo este fluxo contrário ao movimento de difusão do P dissolvido, podendo retardar ou restringir a difusão do P (LOMBI et al., 2006).

Após a hidratação do grânulo, ocorre a produção de uma solução de alta concentração, que pela elevada pressão osmótica provoca o movimento do P para fora dos grânulos (DEGRYSE; MCLAUGHLIN, 2013). A adição do nutriente aumenta o gradiente de concentração aumentando a difusão, assim como a presença de água no solo favorece a difusão diretamente sobre o coeficiente de difusão e por reduzir a tortuosidade do caminho difuso (BARBER, 1995).

Portanto, na região do solo ao redor dos grânulos do fertilizante a dinâmica do P apresenta alta concentração eletrolítica com aumento na força iônica do P, condição que altera a dinâmica das cargas com aumento do potencial eletronegativo dos minerais destes solos (SHEN et al., 2011; BOLAN et al., 2013). Processo que ocorre pela troca de ligantes com os minerais, principalmente, nos sesquióxidos de Fe e Al, a qual independe das cargas de superfície dos minerais (SHUAI; ZINATI, 2009), condição que altera a mobilidade do P.

Somado a isto, os fertilizantes formulados com a presença de N no fertilizante, pode interferir na difusão do P, em razão do aumento da concentração eletrolítica e competição com as cargas de superfície, mesmo sendo um elemento fracamente adsorvido aos colóides do solo por ligações de caráter eletrostático.

A maioria dos trabalhos científicos com a adubação fosfatada é fundamentada na dinâmica do P no solo, sendo poucos os trabalhos que demonstram a interação do N sobre a mobilidade de P a partir de formulações de fertilizantes organominerais. O conhecimento da interação entre N e P em fertilizantes organominerais trará o conhecimento para formulações com maior eficiência na disponibilidade de P, tendo como princípio estudos de difusão na região do solo ao redor dos grânulos, que auxiliará o manejo da adubação fosfatada.

Desta forma, o objetivo do trabalho foi avaliar difusão e a disponibilidade do P em Latossolo Vermelho Distroférrico na região ao redor dos grânulos dos fertilizantes em resposta a diferentes concentrações de N em interação na formulação dos fertilizantes organominerais a base de cama de aves.

6.2 Material e métodos

6.2.1 Caracterização do solo utilizado no experimento

Os aspectos relacionados a caracterização experimental foram descritos no Capítulo 1 no item 5.2.1.

6.2.2 Fósforo remanescente e capacidade máxima de adsorção de fósforo do Latossolo Vermelho Distroférico

O valor do P remanescente (P-rem) antes da calagem deste solo foi de 13,6 mg kg⁻¹ determinado conforme metodologia descrita por Alvarez et al. (2000). A determinação do P-rem foi realizada pela agitação de 2,5 g de amostra de solo durante cinco minutos em solução de CaCl₂ (0,01 mol L⁻¹) na concentração de 60 mg L⁻¹ de P, sendo posteriormente deixadas em repouso para decantação durante o período de 16 horas. Na alíquota na solução de equilíbrio foi determinada a concentração de P em colorimetria pelo método do ácido ascórbico (BRAGA; DEFELIPO, 1974).

A capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) pela isoterma de Langmuir foi de 729,6 mg kg⁻¹ (Figura 6), obtido após curva de adsorção de P conforme procedimentos descritos por Graetz e Nair (2000). Para a determinação de CMAP foi utilizado 2,5 g de solo sendo adicionado solução de CaCl₂ (0,01 mol L⁻¹) em diferentes concentrações de P até a dose de 180 mg L⁻¹ a partir de uma solução de KH₂PO₄ (1000 mg L⁻¹), calculadas de acordo com o P remanescente (P-rem). Após, foi realizado a agitação em centrífuga a 3000 rpm por 15 min e o teor de P na alíquota das amostras determinado em colorimetria pelo método do ácido ascórbico (BRAGA; DEFELIPO, 1974)

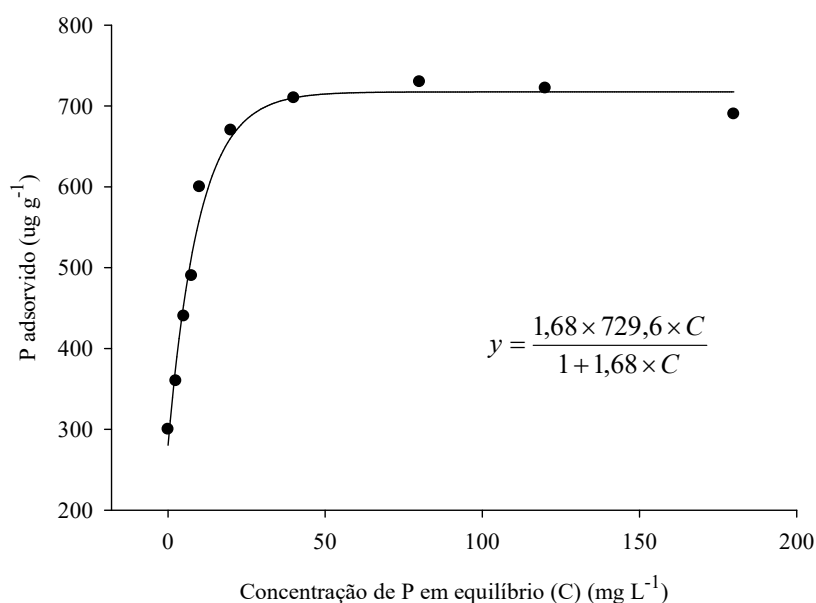


Figura 6. Capacidade máxima de adsorção de fósforo do Latossolo Vermelho Distroférico em condições naturais antes da instalação do experimento, ajustado por meio da curva de adsorção à isoterma de Langmuir.

6.2.3 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial $5 \times 8 + 1$, com seis repetições. Os tratamentos foram constituídos de oito concentrações de N total (0; 2,9; 4,4, 8,8, 11,8, 17,6, 25,0 e 32,3 mg/placa) presentes no fertilizante organomineral, além dos controles sem adubação e superfosfato triplo (sem N). A dose de interação de P em todos os fertilizantes em teste foi fixada em 8,8 mg/placa de P. Para as análises de P foram amostrados anéis concêntricos em diferentes distâncias a partir do ponto central de deposição dos fertilizantes (0–7,75; 7,76–13,5; 13,51–25,5; e 25,51–43 mm) em cinco tempos de incubação (7, 14, 21, 28 e 35 dias após a aplicação dos fertilizantes).

6.2.4 Produção dos fertilizantes

Na produção das formulações do fertilizante organomineral (OM), o material orgânico foi constituído de cama de aves de corte, retirada após seis lotes de criação com 42 dias cada e apresentou 20, 20 e 18 g kg⁻¹ de N, P e K, respectivamente, em sua composição. Para a formulação do OM foi considerado os teores de N e P presentes na cama de aves. Como fonte mineral foram utilizados a ureia (CO(NH₂)₂) (45% de N) e o superfosfato triplo (Ca(H₂PO₄).2H₂O) (46% P₂O₅) na forma em pó. Para a granulação do fertilizante organomineral a cama de aves foi micronizada (moída e peneirada na granulometria de 1,0 mm).

A mistura dos materiais (orgânico e mineral) foi feita de forma homogênea previamente com as quantidades de cada material para compor cada formulação em teste, sendo posteriormente colocado granulador de disco usando 1% de bentonita como adjuvante para dureza ao material e 0,5% de silicato de cálcio neutro como aglomerante para a granulação do fertilizante, conforme demonstrado na tabela 2. Após o processo de granulação, o fertilizante organomineral foi peneirado entre malhas de 1 e 4 mm, sendo separado o material retido entre as duas peneiras, o qual foi seco em estufa de circulação forçada de ar à 65°C por 48 h.

Tabela 3. Característica final dos fertilizantes utilizados e a quantidade aplicada para compor cada tratamento de fósforo com as doses de interação de nitrogênio.

Tratamento Fertilizante	Dose de P (mg/placa)	Dose de N	Formulação (%) N–P–K	Quantidade aplicada (mg/placa)
SFT	8,8	0	0–20–0	44,0
OM	8,8	2,9	2–6–0	147
OM	8,8	4,4	3–6–0	147
OM	8,8	8,8	6–6–0	147
OM	8,8	11,8	8–6–0	147
OM	8,8	17,6	12–6–0	147
OM	8,8	25,0	17–6–0	147
OM	8,8	32,3	22–6–0	147

Análise química dos fertilizantes determinada de acordo com metodologia oficial do Ministério da Agricultura (Brasil, 1983).

6.2.5 Experimento placas de petri

As descrições relacionadas ao experimento das placas de petri foram descritas no Capítulo 1 no item 5.2.4.

6.2.6 Análise química do solo retirado das seções das placas de petri

As amostras retiradas das seções da placa de petri foram homogeneizadas para a determinação do P disponível por extração em solução de duplo ácido de Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$) na proporção solo:extrator 1:10 (m/v) conforme descrito por Tedesco et al. (1995). A leitura dos teores de P nas alíquotas foi realizada pela absorbância em espectrofotômetro a 882 nm conforme o método de Murphy e Riley (1962).

6.2.7 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise da homogeneidade da variância e da normalidade. Depois de atendidos os pressupostos paramétricos foi realizada a análise de variância através do teste F, considerando o modelo experimental

inteiramente casualizado para avaliação do efeito de tratamentos. Quando houve diferença significativa, o efeito dos tratamentos e das épocas de coleta (tempos de incubação) foram comparadas pelo teste LSD ($P \leq 0,05$). Adicionalmente foi realizada análise de correlação de Pearson em ajuste linear para avaliar o comportamento da disponibilidade de P total das seções nos tempos de incubação.

6.3 Resultados e discussão

O teor e a dose de nitrogênio (N) em interação com o fósforo (P) no fertilizante organomineral (OM) alterou a mobilidade e disponibilidade do P na região do solo ao redor dos grânulos (Figura 7). Com sete dias após a aplicação dos fertilizantes os maiores teores de P disponíveis foram demonstrados nas duas primeiras seções, com as doses de interação de 11,8 e 32,3 mg/placa de N nas seções 1 (0–7,75 mm) e 2 (7,76–13,50 mm), respectivamente. Neste tempo de incubação de sete dias houve deslocamento do P no superfosfato triplo (SFT) sem N em interação na seção 3 (13,51–25,50 mm) e em OM nas doses 2,9 e 17,6 mg/placa de N na seção 4 (25,51–43,0 mm).

A justificativa para os maiores teores nos OM com 11,8 e 32,3 mg/placa de N nas seções 1 e 2 pode estar relacionada a reação de hidratação dos grânulos, com fluxo da água do solo por capilaridade em direção aos poros higroscópicos, movimento que ocorre em sentido contrário ao de difusão do P dissolvido e pode retardar ou restringir a difusão do P (LOMBI et al., 2004). Nesta reação inicial dos fertilizantes no solo ocorre alta saturação de P próxima ao grânulo do fertilizante, onde a capacidade de adsorção do P é rapidamente excedida (LOMBI et al., 2006), tal como a alta concentração eletrolítica na solução favorece a formação de precipitados (LUENGO et al., 2006; SHEN et al., 2011) e difusão do P para região com capacidade de adsorção ainda não excedida no solo (BOLAN et al., 2013; JIANG et al., 2015).

Já as justificativas para superfosfato triplo (SFT) ter alcançado a seção 3 e os OM nas doses 2,9 e 17,6 mg/placa de N na seção 4 pode estar relacionado a estes materiais terem explorado melhor o efeito da calagem, que contribuiu para o aumento do potencial elétrico negativo do solo em razão da elevação da saturação por bases, condição que permite aumentar o espessamento da dupla camada difusa dos colóides e interferir na mobilidade de P (ERNANI; RIBEIRO; BAYER, 2006).

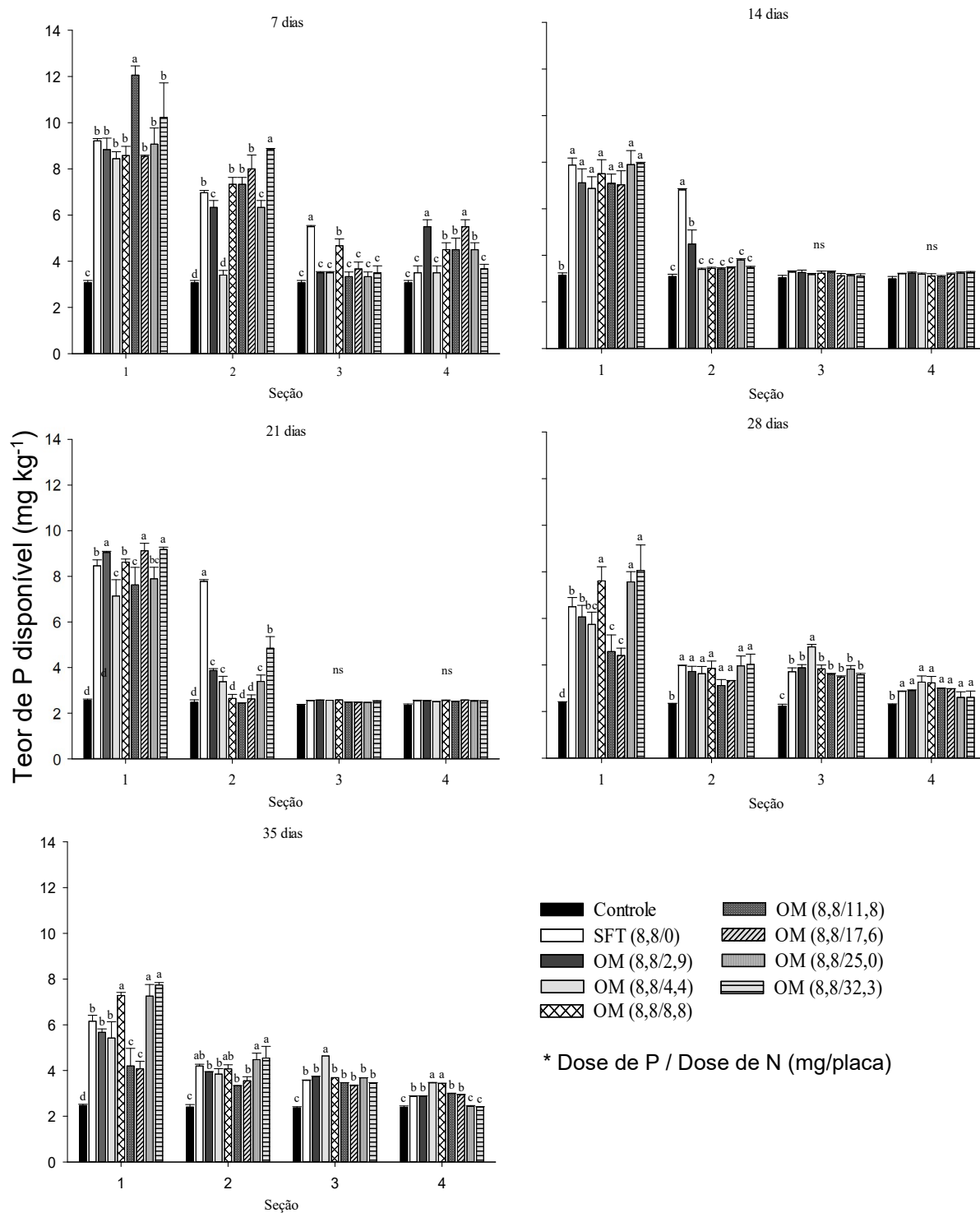


Figura 7. Teor de fósforo (P) disponível (Mehlich-1) em Latossolo Vermelho Distrófico nas seções em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Legenda – Seção 1 = 0 – 7,75 mm; Seção 2 = 7,76 – 13,50 mm; Seção 3 = 13,51 – 25,50 mm; e Seção 4 = 25,51 – 43,0 mm. Barras verticais em cada ponto representam o erro padrão dos valores. Médias com letras distintas diferem pelo teste de LSD ($p \leq 0,05$) dentro de cada seção.

Outra condição que explica a difusão do P no solo está relacionada a própria adsorção elevar o potencial negativo dos colóides minerais pelo processo de troca de ligantes, que independe do potencial elétrico das cargas de superfície (BARROW, 2015). Assim como, a presença de outros elementos no grânulo do fertilizante, como o N, aumenta a concentração eletrolítica e promovem alterações químicas que interferem na maior ou menor disponibilidade e difusividade do P.

Nos tempos de 14 e 21 dias houve diferença no teor de P disponível que ocorreu até a seção 2 (Figura 7). Com 14 dias na seção 1 os maiores teores de P disponível são demonstrados em todos os tratamentos que receberam aporte de P, com difusão para seção 2 apenas nos fertilizantes fosfatados sem N (SFT) e OM na menor dose de N em interação de 2,9 mg/placa. Aos 21 dias os maiores teores ocorrem nos tratamentos com OM nas doses de interação de 2,9, 17,6 e 32,1 mg/placa de N na seção 1 e, em SFT na seção 2.

O SFT (sem N) permitiu que a difusão do P alcançasse novas frentes de mobilidade mais rapidamente em comparação aos fertilizantes OM, em razão de conseguir exceder a capacidade de adsorção de P na região do solo ao redor do grânulo do fertilizante, justificado nos resultados da seção 2 aos 14 e 21 dias (Figura 7). Portanto, a presença de matéria orgânica e de N no fertilizante influenciou na difusividade do P na região do solo ao redor dos grânulos.

A ausência de significância nas seções 3 e 4 aos 14 e 21 dias, antes evidenciada aos sete dias (Figura 7), pode estar relacionada a capacidade adsorção ou os sítios de adsorção do solo ainda não terem sido excedidos em ambas as seções, não permitindo a detecção da forma disponível de P pelo método de Mehlich-1 até este momento. Na seção 2, com 14 dias pode-se inferir que o SFT excede a capacidade de adsorção da porção do solo nesta seção permitindo a mobilidade até a seção 3, enquanto, que aos 21 dias apenas os OM nas doses de 2,9, 4,4, 25,0 e 32,3 mg/placa de N começam a exceder a capacidade de adsorção do solo desta seção.

Estes resultados permitem afirmar ainda que aos sete dias o P solubilizado pelos fertilizantes ainda não tinham sido adsorvidos em formas mais estáveis (bidentada ou binucleadas), sendo possível sua detecção na forma solúvel ou lábil no solo das quatro seções da placa de petri.

A pequena fração de fósforo remanescente ($13,6 \text{ mg kg}^{-1}$) associada a alta capacidade de adsorção (Figura 6) estão relacionados ao predomínio de formas

cristalinas de Fe e Al na fração argila desta classe de solo, de característica oxídicas, o que permite formar ligações de alta energia de caráter covalente, o que torna o P pouco disponível e móvel no solo (BARROW, 2015), sendo sua mobilidade restrita a água de difusão (DEGRYSE; MCLAUGHLIN, 2013; JIANG et al., 2015).

Aos 28 dias pode ser observado que as seções 3 e 4 tem apresentou teores de P disponível diferente do controle em todos os tratamentos que receberam aporte de P (Figura 7). Aos 35 dias é alcançada a estabilidade na difusão do P na placa de petri, por apresentar teores de P disponível próximos aos 28 dias, e neste momento é possível afirmar que o teor de N no fertilizante organomineral e a dose aplicada interfere na difusão do P no solo, onde as concentrações de 4,4 e 8,8 mg/placa apresentaram os maiores teores nas seções 3 e 4. Portanto, indicando que as menores doses de N permitem maior mobilidade, enquanto as maiores doses de 25,0 e 32,3 mg/placa de N permitem menor difusão do P, justificado pelos maiores teores de P disponível se encontrarem próximos do grânulo de fertilizante.

Em razão do fertilizante OM na dose de 2,9 mg/placa de N ser igual significativamente ao SFT quanto a difusão de P aos 35 dias (Figura 8), não é atribuído a justificativa de que a MO presente no fertilizante possa apresentar competição entre ânions orgânicos e o ortofosfato pelos mesmos sítios de adsorção nos colóides do solo (SHUAI; ZINATI, 2009), mesmo os fertilizantes OM com as menores doses de N (4,4 e 8,8 mg/placa) terem sido superiores a fonte mineral. Condição esta, que pode ser atribuída a interação entre P e N no grânulo do fertilizante ou no solo pela dose aplicada.

Avaliando a proporção para o teor de P disponível em cada seção, onde foram descontados os valores iniciais do solo fica evidente que os maiores valores se apresentam na seção 1 em todos os tempos de incubação avaliados, em relação ao total disponibilizado, independente do fertilizante (Figura 8).

Aos sete dias houve deslocamento do P proveniente dos fertilizantes até a seção 2 com valores variando de 27 a 41% do P total disponível, com exceção do fertilizante OM na dose de 4,4 mg/placa de N, que manteve 82% do P disponível na seção 1 e o menor teor total em relação ao demais tratamentos (Figura 8). Possivelmente, o OM na dose de 4,4 mg/placa não permitiu que a fosse excedida a capacidade de adsorção do P na porção do solo da seção 2, não permitindo o deslocamento de P às seções posteriores mais afastadas dos grânulos dos fertilizantes.

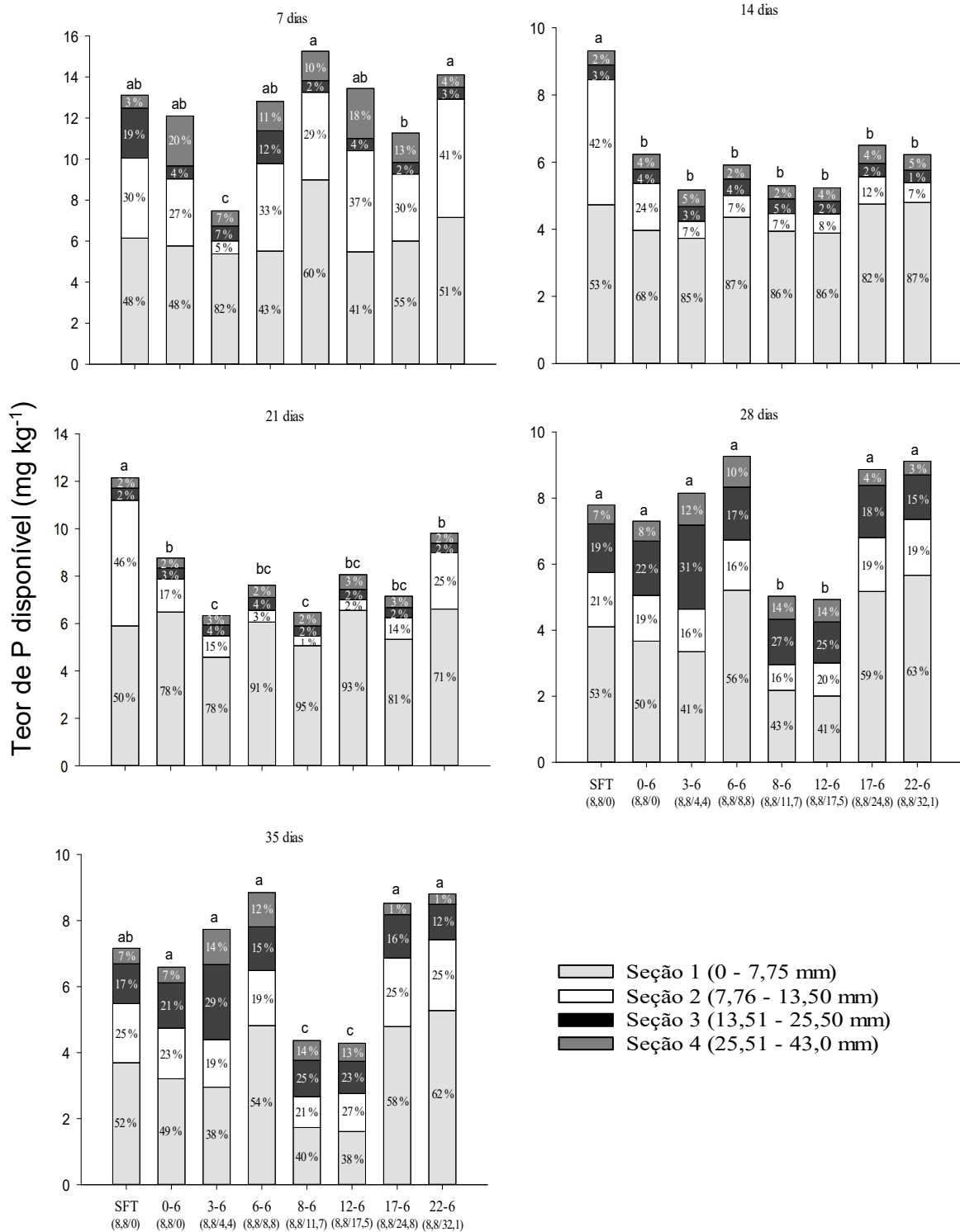


Figura 8. Distribuição dos teores de fósforo (P) disponível (Mehlich-1) proveniente dos fertilizantes nas seções em Latossolo Vermelho Distroférico nas seções em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Médias com letras distintas diferem pelo teste de LSD ($p \leq 0,05$). Valores descontados do tratamento controle sem adubação.

Nos tempos de 14 e 21 dias o maior teor total de P disponível ocorre em SFT (sem N) com deslocamento até a seção 2 com proporções de 42 e 46%, respectivamente (Figura 8). Nos fertilizantes OM em doses de interação de N a partir de 4,4 mg/placa, houve redução no P disponível aos 14 dias na seção 2 em relação ao tempo de sete dias. Resultados que permitem inferir que a presença de N em OM favoreceu a mobilidade do P, e a formação de ligações mais estáveis e a redução da labilidade nesta segunda seção, uma vez que a proporção de P no OM na menor dose de N (2,9 mg/placa) permaneceu praticamente inalterada nos 7 e 14 dias, com 27 e 24%, sendo que apenas aos 21 dias houve redução para 17%.

Doses de N a partir de 4,4 mg/placa via fertilizantes OM altera a disponibilidade e a mobilidade por difusão do P no solo, o que pode ser justificado em virtude do aumento da concentração eletrolítica, a qual favorece o coeficiente de difusão (BARBER, 1995) e altera a dinâmica das cargas com o aumento do potencial eletronegativo dos minerais destes solos (SHEN et al., 2011; BOLAN et al., 2013) na região do solo da adjacência dos grânulos dos fertilizantes. O que permite formar complexos na forma lábil e, posteriormente, menos lábil (SHEN et al., 2011) de forma mais rápida que os fertilizantes SFT e OM na menor dose de N (2,9 mg/placa).

O fertilizante OM na dose de N de 2,9 mg/placa apresenta outros nutrientes, principalmente, provenientes da fonte orgânica (cama de aves) com maior proporção neste formulado em relação aos demais, que também podem contribuir no aumento da concentração eletrolítica, e conforme descrito anteriormente, ajudaria a explicar a menor disponibilidade de P, principalmente na seção 2 aos 14 e 21 dias.

Inicialmente no solo, a tendência do P proveniente dos fertilizantes é de formar complexos de maior labilidade com os colóides do solo (SHEN et al., 2014), a qual pode sofrer interferência pelo aumento da concentração eletrolítica proporcionada pelas doses de N dos fertilizantes, aumentando a pressão do fluxo difusivo do P para seções mais afastadas do grânulo. Porém, as velocidades das reações do N são muito mais rápidas que as do P e, a sua fraca interação com os colóides e maior mobilidade diminui a concentração eletrolítica no solo da seção 1, permitindo a formação de complexos de maior energia do P no solo a partir dos 14 dias.

Aos 28 dias ocorreu aumento nas proporções de P disponível, principalmente nas seções 2 e 3 e a partir de 28 dias há tendência de uniformização tanto para teor no solo quanto na proporção de distribuição para todos os fertilizantes (Figura 8).

Após 28 dias doses de 11,8 e 17,6 mg/placa de N no fertilizante OM possibilita a maior adsorção de P na seção ao redor do grânulo (seção 1) (Figura 8). Os fertilizantes com doses de interação maiores que 17,6 mg/placa de N permitem menor mobilidade de P em relação aos demais até a última seção aos 35 dias. Porém, os tratamentos OM nas concentrações 11,8 e 17,6 mg kg⁻¹ de N apresentam os menores teores totais de P disponível.

Na soma dos teores de P disponível das seções pode ser observado efeito diferenciado no comportamento do P disponível ao longo dos tempos de incubação entre os tratamentos (Figura 9). Os maiores teores P disponível ocorre aos sete dias com redução até os 35 dias, onde todos os fertilizantes demonstraram diferentes capacidades de disponibilidade e adsorção do P no solo, justificado pelo valor do coeficiente angular de cada fórmula que fora estabelecido em função da interação entre P e N nos fertilizantes OM e intrínseco do SFT.

Os fertilizantes nas concentrações de interação sem N (SFT) e OM nas doses de interação de 2,9, 11,8, 17,6, 25,0 e 32,3 mg/placa de N demonstram uma maior disponibilidade do P com sete dias após a aplicação no solo, sofrendo mais intensamente o processo de adsorção do P com os colóides do solo (Figura 9).

A rápida disponibilidade do P proveniente dos fertilizantes ao solo pode não ser benéfica, pois, aumenta o tempo de contato do P com a fase mineral do solo e os sítios adsorventes (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008), caso dos maiores coeficientes angulares apresentados em SFT (sem N) e, nos OM nas doses de interação de 11,8 e 17,6 mg/placa de N, o que permite inferir sobre a possibilidade na formação de complexos com menor labilidade, principalmente, em solos de características oxídicas (BOLAN et al., 2013).

A formação de complexos covalentes de menor labilidade do P com os colóides do solo não ocorre de imediato no solo logo após a aplicação dos fertilizantes (GATIBONI et al., 2008). Com o avançar do tempo de contato do P com os colóides do solo, pode ocorrer ainda a penetração nas imperfeições dos minerais de cargas dependentes, sendo esta forma denominada não lábil (BARROW et al., 2015; BOLAN et al., 2013).

Pode ser observado que os fertilizantes OM nas doses de interação de 4,4 e 8,8 mg/placa de N demonstram menor efeito de adsorção no solo, justificado pelos menores coeficientes angulares de -0,06 e -0,18 (Figura 9). Estes tratamentos indicam uma menor disponibilidade P no solo por estas formulações de fertilizantes.

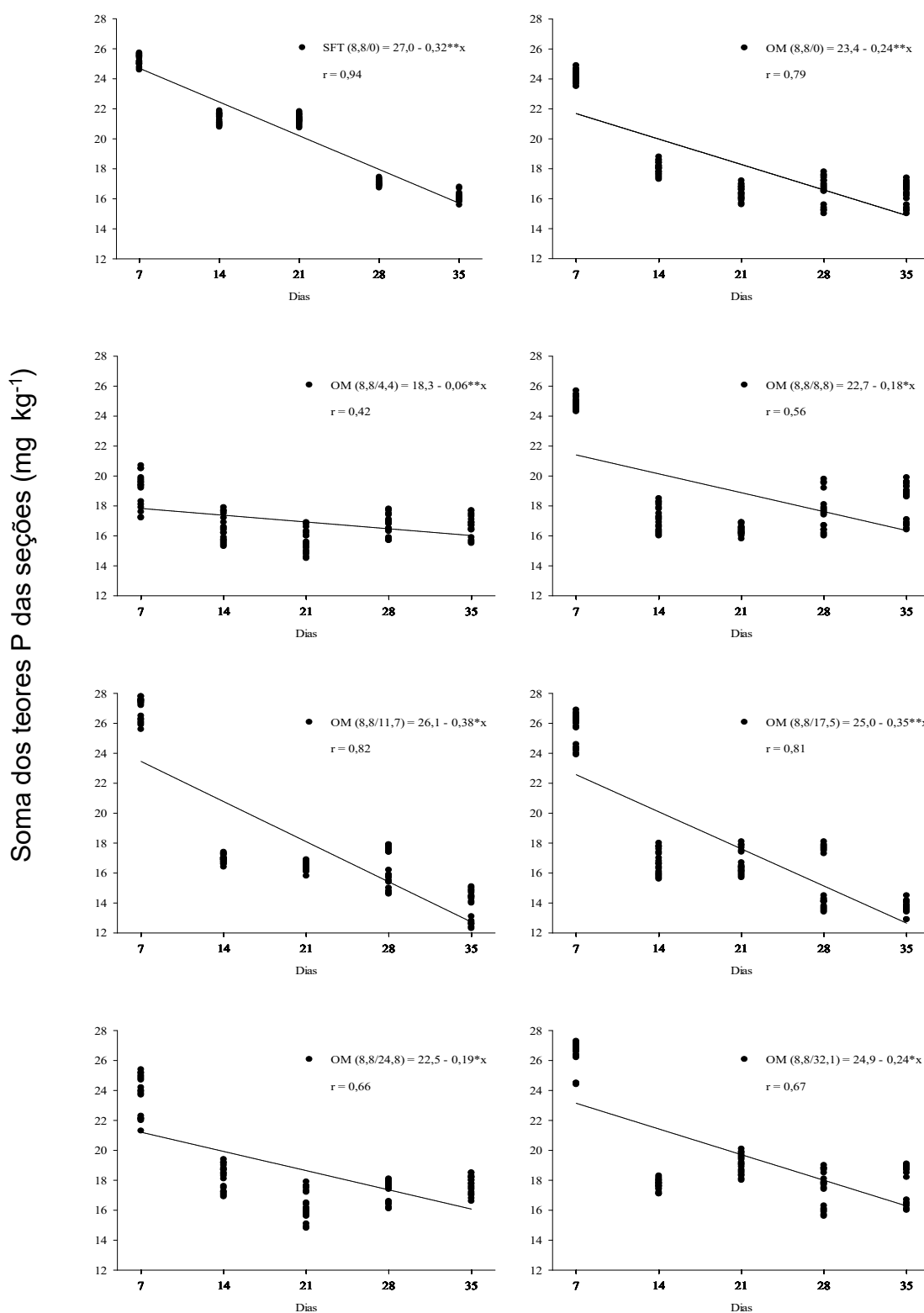


Figura 9. Soma dos teores de fósforo (P) disponível (Mehlich) em Latossolo Vermelho Distrófico em diferentes dias após a aplicação dos fertilizantes. Somatório das seções 1 (0 – 7,75 mm), 2 (7,76 – 13,50 mm), 3 (13,51 – 25,50 mm) e 4 (25,51 – 43,0 mm). * = p≤0,05; ** = p≤0,01.

O teor de N no fertilizante organomineral e a dose aplicada promove alterações químicas distintas que influenciam a disponibilidade e mobilidade do P disponível em solo com caráter oxidico. Apesar dos poucos estudos e conhecimentos da interação entre P e N via fertilizante, o entendimento e compreensão desta interação é imprescindível para otimizar o aproveitamento da adubação fosfatada com uso simultâneo de N e o desenvolvimento de fertilizantes. Resultados estes, que permitiu indicar doses de N iguais ou inferiores a 8,8 ou iguais ou superiores a 24,8 mg/placa para maior disponibilidade e mobilidade do P em Latossolo Vermelho Distroférico.

6.4 Conclusões

O teor de N e a dose via fertilizante organomineral promove alterações químicas na região do solo ao redor dos grânulos dos fertilizantes que influenciaram na mobilidade por difusão e na disponibilidade do P.

Os maiores teores de P disponível ocorreram com sete dias após a aplicação dos fertilizantes, diminuindo até os 35 dias de incubação, sendo em geral os maiores teores nas seções 1 (0–7,75 mm) e 2 (7,76–13,5 mm) mais próximas ao grânulo dos fertilizantes.

O tratamento com superfosfato triplo (sem N) promoveu maior deslocamento e teor de P disponível nas seções avaliadas nas placas de petri, enquanto, uma menor disponibilidade e adsorção do P é demonstrada nas doses de interação N de 4,4 e 8,8 mg/placa das formulações intermediárias de organomineral com significativo aumento a partir dos 28 dias.

6.5 Referências

ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa-MG, v.25, p.27-32, 2000. (Boletim Informativo).

ARAI, Y.; SPARKS, D. L. Phosphate reaction dynamics in soils and soil minerals: a multiscale approach. **Advances in Agronomy**, v.94, p.135–179, 2007. DOI: 10.1016/S0065-2113(06)94003-6

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2nd. New York, John & Wiley, 1995. 384p.

BARROW, N. J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **European Journal of Soil Science**, v.66, p.9–18, 2015. DOI: 10.1111/ejss.12198_2

BOLAN, N. et al. Phosphorus–arsenic interactions in variable-charge soils in relation to arsenic mobility and bioavailability. **Science of the Total Environment**, v.463–464, p.1154–1162, 2013. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.04.016

BORTOLON, L. et al. A. Degree of phosphorus saturation threshold for minimizing P losses by runoff in cropland soils of Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1088–1098, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900008

BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. **Revista Ceres**, v.113, p.73–85, 1974.

CARVALHO, W. A.; ESPÍNDOLA, C. R.; PACCOLA, A. A. **Levantamento de solos da fazenda Lageado**. Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu-SP, 1983. 95p. (Boletim Científico, n.1).

CUNHA, J. C. et al. Quantification of permanent and variable charges in reference soils of the state of pernambuco, brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.38, p.1162–1169, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000400012

DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Phosphorus Diffusion from Fertilizer: Visualization, Chemical Measurements, and Modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v.78, p.832–842, 2013. DOI:10.2136/sssaj2013.07.0293

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. F.; S BAYER, C. Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.35, p.889–901, 2006. DOI:10.1081/CSS-120030365

FERNANDES, D. M. et al. Fósforo na solução do solo em resposta a aplicação de fertilizantes fluidos mineral e organomineral. **Irriga**, v.1, p.14–27, 2015. DOI: 10.15809/irriga.2015v1n1p14

GATIBONI, L. C. et al. Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos de suíno em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1753–1761, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000400040

GRAETZ, D. A.; NAIR, V. D. Phosphorus sorption isotherm determination. In: PIERZYNSKI GM (ed). **Methods of phosphorus analysis for soils, sediments and Waters**. USDA-CSREES, Regional Committee, 2000. p. 35-38. (Southern cooperatives series bull, 396)

JIANG, J. et al. Mobilization of phosphate in variable-charge soils amended with biochars derived from crop straws. **Soil & Tillage Research**, v.146, p.139–147, 2015. DOI: 10.1016/j.still.2014.10.009

LOMBI, E. et al. Speciation and distribution of phosphorus in a fertilized soil: A synchrotron-based investigation. **Soil Science Society of America Journal**, v.70, p.2038–2048, 2006. DOI: 10.2136/sssaj2006.0051

LOMBI, E. et al. Mobility and Lability of Phosphorus from Granular and Fluid Monoammonium Phosphate Differs in a Calcareous Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.682–689, 2004. DOI: 10.2136/sssaj2004.6820

LUENGO, C. et al. Kinetics of phosphate adsorption on goethite: comparing batch adsorption and ATR-IR measurements. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.300, p.511–518, 2016. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.04.015

MARTINAZZO, R. et al. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.563–570, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000300016.

MCLAUGHLIN, M. J. et al. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils-implications for fertilizer management and design: An Australian perspective. **Plant Soil**, v.349, n.1, p.69–87, 2011. DOI:10.1007/s11104-011-0907-7

MONTALVO, D.; DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Agronomic Effectiveness of Granular and Fluid Phosphorus Fertilizers in Andisols and Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v.79, n.2, p.577–584, 2015. DOI:10.2136/sssaj2014.04.0178

MORAES, F. A.; GATIBONI, L. C. Phosphorus availability and microbial immobilization in a Nitisol with the application of mineral and organo-mineral fertilizers. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.87, n.4, p.2289–2299, 2015. DOI: 10.1590/0001-3765201520140008

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta.**, v.27, p.31–36, 1962.

TEDESCO, M., J. et al. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 212 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

RAIJ, B. Van. et al. **Recomendação de adubação e calagem para o estado do São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1997. 300p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. Van. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 2001. 285p.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C. KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, n.2, p.576–586, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000200049

SHEN, J. et al. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v.156, p.997–1005, 2014. DOI: 10.1104/pp.111.175232

SILVA, R. C. **Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada**. 2013. 166p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2013.

SHUAI, X.; ZINATI, G. Proton charge and adsorption of humic acid and phosphate on goethite. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n.6, p.2013-2020, 2009. DOI:10.2136/sssaj2009.0119

SOUZA, M. F. et al. competitive sorption and desorption of phosphate and citrate in clayey and sandy loam soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1153–1161, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000400011

WILLIAMS, R. F. The effect of phosphorus supply on the rates of intake of phosphorus and nitrogen and upon certain aspects of phosphorus metabolism in gramineous plant. **Australian Journal of Scientific Research**, v.1, n.3, p. 333–341, 1948.

CAPÍTULO 3

INTERAÇÃO ENTRE FÓSFORO E NITROGÊNIO EM FERTILIZANTE ORGANOMINERAL

RESUMO

A recomendação de adubação é dentre as práticas na agricultura a de maior relevância para estabelecer novos patamares de produção, com ênfase para as inovações em fertilizantes. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da interação entre fósforo e nitrogênio (P×N) interagindo em cinco concentrações de cada nutriente em fertilizante organomineral a base de cama de aves no crescimento das plantas milheto e, no fósforo (P) e nitrogênio (N) de um Latossolo Vermelho Distroférrico. O experimento foi conduzido em casa de vegetação em delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial 5×5, com quatro repetições. Os tratamentos corresponderam ao equivalente a cinco doses de P (0, 20, 40, 60 e 80 kg ha⁻¹ de P) em interação com cinco doses de N (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N). Foram realizados três cultivos sequenciais de milheto com 40 dias de crescimento cada, sendo colhido a parte aérea das plantas para determinar biomassa seca e os teores de N e P para compor o acúmulo. Após cada cultivo foram coletadas amostras do solo do vaso para as determinações do P disponível e as formas de N orgânico. O P e N presentes no fertilizante organomineral promoveram efeito de interação entre os dois nutrientes, com efeito mais pronunciado sobre as plantas do que no solo. No solo não houve efeito da interação sobre as formas de N orgânico, sendo apenas demonstradas diferenças no P disponível na dose interação P×N de 20×200 kg ha⁻¹ com os maiores teores. Houve efeito de interação na produção de biomassa seca apenas no primeiro cultivo, com os maiores incrementos nas doses de interação P×N a partir de 20×100 kg ha⁻¹. No teor e acúmulo de N houve maior resposta no primeiro cultivo, enquanto, para o P houve resposta significativa nos três cultivos. Os incrementos no acúmulo de P e N na parte aérea das plantas são demonstradas quando a interação entre P×N pelo fertilizante organomineral ocorre em doses iguais ou superiores à 20×150 e 40×50 kg ha⁻¹, respectivamente.

Palavras-chave: cama de aves, adubação, relação, efeito.

PHOSPHORUS AND NITROGEN INTERACTION IN ORGANOMINERAL FERTILIZER

ABSTRACT

Fertilization recommendation is the most important practice in agriculture to establish new production level, highlighted on fertilizer innovations. The aim of this research was to evaluate the interaction between phosphorus and nitrogen (P×N) interacting in five concentrations of each nutrient in organomineral fertilizer from poultry litter in the growth of millet crop, and P and N in an Typic Hapludox (Oxisol). The experiment was carried out in greenhouse in a completely randomized design in factorial scheme 5×5, with four replications. Treatments consisted of the equivalent of five doses of P (0, 20, 40, 60 e 80 kg ha⁻¹) in interaction with five doses of N (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹). Three sequential crops of millet were performed with 40 days growth each, being harvested the shoot of the plants to determine the dry biomass and the P and N content to calculate the accumulation. After each cultivation were collected the soil into the pots for analysis of P available and organic N forms. The P and N present in organomineral fertilizer promotes interaction effect between two nutrients, with a more pronounced effect on plants than on soil. In the soil there are not interaction effect on the organic N forms, only being demonstrated differences in P available in P×N dose interaction of 20×200 kg ha⁻¹ with highest contents. There is interaction effect in shoot dry biomass only in first crop, with the highest increases in interaction doses P×N from 20×100 kg ha⁻¹. In the content and accumulation of N there is high response in first crop, while, for P there are significant effect in three crops. Increases in P and N accumulation in shoot dry biomass of plants are demonstrated when the interaction between P×N by the organomineral fertilizer occur in doses equal or superior to 20×150 e 40×50 kg ha⁻¹, respectively.

Keywords: poultry litter, fertilization, relation, effect.

7.1 Introdução

O desenvolvimento e inovação de novos fertilizantes é estratégico para o agronegócio, devido à grande demanda de importação, pois 75% dos fertilizantes consumidos no Brasil são importados (ANDA, 2016). Dentre as novas tecnologias, os fertilizantes organominerais elaborados a partir de matérias-primas disponíveis em grande escala como os resíduos das cadeias produtivas de aves, permitem a produção de formulações adaptadas às demandas nutricionais das culturas para as diferentes classes de solos e o reaproveitamento destes resíduos a maiores distâncias dos locais de concentração da produção de aves (CORREA et al., 2016).

No Brasil, os solos predominantes são caracterizados como oxídicos, que possuem alto grau de intemperismo, com predominância de cargas variáveis e baixa fertilidade natural (CUNHA et al., 2014; SILVA et al., 2017). Ocorrendo a necessidade de aplicação frequente de altas doses de fertilizantes, principalmente, para nitrogênio (N) e fósforo (P), sendo suas formas e concentrações no solo fator determinante no rendimento dos sistemas agrícolas (FAGERIA; BALIGAR, 2014; LACERDA et al., 2015).

Nestes solos, a eficiência dos fertilizantes fosfatados está relacionada às reações de adsorção e precipitação que controlam o destino do P (MONTALVO; DEFYSE; MCLAUGHLIN, 2015), principalmente, a adsorção devido à alta energia de ligação do ânion fosfato com os grupos funcionais de superfície mineral (SHUAL; ZINATI, 2009; BOLAN et al., 2013). Enquanto, a eficiência do N dos fertilizantes está relacionada à processos diversos, como: dessorção, adsorção, lixiviação, volatilização, nitrificação, desnitrificação, imobilização e mineralização (ZHANG et al., 2011; PAUNGFOO-LONHIENNE et al., 2012).

A maioria dos trabalhos científicos avaliam o uso destes nutrientes isoladamente na adubação, sendo pouco estudado o efeito da interação entre fósforo e nitrogênio (P×N) e os mecanismos envolvidos neste processo. Na adubação das culturas ocorre o fornecimento do P e do N muitas vezes em conjunto no fertilizante no momento da aplicação localizada ou em área total no solo. Assim, a eficiência dos fertilizantes organominerais pode também estar associada às concentrações destes elementos na formulação, interferindo na dinâmica destes nutrientes no solo e na nutrição das plantas.

Porém, há poucos esforços científicos para entendimento da interação entre estes dois elementos (BINKLEY; MATSON, 1983; CHEN et al., 2017). As concentrações dos nutrientes mudam entre si no solo ao longo do tempo, podendo criar interações entre nutrientes, tendo como resultado a combinação sinérgica ou antagônica, podendo afetar direta ou indiretamente na resposta das culturas (GROOT et al., 2003; ZHANG et al., 2007). Portanto, o fornecimento destes nutrientes simultaneamente ao solo ocasiona alterações nos atributos químicos, físicos e biológicos (MAKHANI; ISAAC, 2014; CHEN et al., 2017; YOKOYAMA; IMAI; KITAYAMA, 2017) que podem modificar a dinâmica destes elementos.

Na planta há diversos pontos de interação dependentes do P e N, entretanto, os mecanismos da interação destes elementos ainda são pouco esclarecidos (AGREN; WETTERSTEDT; BILLBERGE, 2012). As plantas não respondem a adubação com N em condições de deficiência de P no solo (SETIYONO et al., 2010). Em níveis adequados ou altos de P na planta ocorre aumento da absorção e acúmulo de N, enquanto que, o incremento da dose de N estimula a absorção de P (AGREN; WETTERSTEDT; BILLBERGE, 2012). Portanto, o N e o P interagem de forma sinérgica, e ambos os nutrientes em níveis adequados promovem aumento na produção vegetal em relação à produção obtida com aplicação de cada nutriente isoladamente (SATTARI et al., 2014, FAGERIA; BALIGAR, 2014).

Desta forma, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da interação entre fósforo e nitrogênio interagindo em cinco concentrações de cada nutriente em fertilizante organomineral a base de cama de aves no crescimento das plantas de milho e, no fósforo e nitrogênio orgânico em Latossolo Vermelho Distroférico.

7.2 Material e métodos

7.2.1 Caracterização do solo utilizado no experimento

Os aspectos relacionados a caracterização experimental do solo utilizado foram descritos no Capítulo 2 no item 6.2.1 e do P remanescente e da capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) do Latossolo Vermelho Distroférico descritos no item 6.2.2.

7.2.2 Delineamento experimental

O experimento de interação foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 5×5, com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos de cinco doses de fósforo (P) (0, 20, 40, 60 e 80 kg ha⁻¹ de P) em interação com cinco doses de nitrogênio (N) (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N) em fertilizante organomineral na forma de complexo. Para tal, foram produzidas diferentes formulações de fertilizante organomineral para compor as doses de interação de P×N, sendo as fórmulas representadas pelos valores de N–P–K: 0–0–0 (controle); 15–0–0; 0–6–0; 1,5–6–0; 2–6–0; 3–6–0; 4–6–0; 4,5–6–0; 5,5–6–0; 6–6–0; 7,5–6–0; 8–6–0; 8,5–6–0; 11,5–6–0; 12–6–0; 17–6–0; e 22–6–0. As unidades experimentais foram constituídas por vasos de polietileno contendo 10,0 kg de massa de solo seco.

7.2.3 Elaboração dos fertilizantes organominerais

Na produção das formulações do fertilizante organomineral (OM), o material orgânico foi constituído de cama de aves de corte, retirada após seis lotes de criação com 42 dias cada e apresentou 20, 20 e 18 g kg⁻¹ de N, P e K, respectivamente, em sua composição. Para a formulação do OM foi considerado os teores de N e P presentes na cama de aves. Como fonte mineral foram utilizados a ureia (CO(NH₂)₂) (45% de N) e o superfosfato triplo (Ca(H₂PO₄)₂·H₂O) (46% P₂O₅) na forma em pó. Para a granulação do fertilizante organomineral a cama de aves foi micronizada (moída e peneirada na granulometria de 1,0 mm).

A mistura dos materiais (orgânico e mineral) foi feita de forma homogênea previamente com as quantidades de cada material para compor cada formulação em teste, sendo posteriormente colocado granulador de disco usando 1% de bentonita como adjuvante para dureza ao material e 0,5% de silicato de cálcio neutro como aglomerante para a granulação do fertilizante, conforme demonstrado na tabela 2. Após o processo de granulação, o fertilizante organomineral foi peneirado entre malhas de 1 e 4 mm, sendo separado o material retido entre as duas peneiras, o qual foi seco em estufa de circulação forçada de ar à 65°C por 48 h.

7.2.4 Experimento de plantas

Na montagem dos vasos, com exceção dos elementos em teste (N e P) aplicaram-se as doses de 160; 23; 1,3; 0,9; e, 1,1 mg kg⁻¹ de potássio, enxofre, cobre, zinco e boro, empregando-se KCl, CaSO₄, CuSO₄, ZnSO₄ e Bórax (Na₂B₄O₇.10H₂O) no solo para fornecer alta disponibilidade em nível ótimo as plantas.

As formulações dos fertilizantes na interação P×N foram incorporadas ao solo em sulco de 0,04 m de profundidade no centro de cada vaso, simulando-se a aplicação localizada em linha e afastada em, aproximadamente 0,04 m das sementes, ambos contendo as quantidades de nutrientes de acordo com as doses estipuladas para teste.

Foram realizados três cultivos sequenciais de milho (*Penissetum glaucum* Leeke) com 40 dias de crescimento cada, contados a partir da emergência das plantas. O cultivo das plantas de milho foram realizados com oito plantas por vaso, mantidos sob irrigação intermitente com água, visando manter a umidade do solo sempre próximo a 80% da capacidade de campo de cada solo.

7.2.5 Métodos analíticos nas plantas

Em cada cultivo, determinou-se a produção de biomassa seca da parte aérea das plantas num período de crescimento 40 dias após a germinação das plantas, mediante corte realizado rente à superfície do solo. O material colhido foi seco em estufa com circulação forçada do ar, a 60°C por 72 horas ou até atingir peso constante, determinando-se a massa seca em balança digital com precisão de duas casas decimais. Posteriormente o material foi moído em moinho de facas até atingir diâmetro menor do que 1,0 mm, para determinação dos teores totais de N e P conforme metodologia descritas por Raij et al (2001). A quantidade acumulada de cada nutriente (mg/vaso) foi estimada pelo produto do seu teor na parte aérea (g kg⁻¹) pela massa seca produzida (g/vaso).

Para a avaliação da eficiência na produção de biomassa seca e nos acúmulos individuais de cada elemento isoladamente, separando o efeito da interação, o cálculo foi estimado com base na proporção do incremento para a interação entre P e N (P×N) em interesse em relação ao incremento promovido pelo fertilizante sem a interação

de um dos elementos (ausência de N ou P) para formulação correspondente à sua respectiva dose de comparação, obtendo a eficiência do elemento em separado.

7.2.6 Métodos analíticos no solo

Em cada cultivo, após 40 dias de crescimento das plantas foi coletado o solo dos vasos para a determinação das análises químicas. A coleta do solo do vaso foi feita retirando uma amostra perpendicular ao sulco de deposição dos fertilizantes, com 0,05 m de espessura e 0,20 m de altura, sendo posteriormente homogeneizado e identificado.

Em seguida à coleta, o solo foi colocado para secar em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C e posteriormente, moído e peneirado em malha de 2,0 mm, para as determinações químicas das formas de N e P.

7.2.7 Análise do fósforo

No solo foi determinado o teor de P disponível pela resina trocadora de ânions conforme descrito por Raij et al (2001). O P total foi determinado por digestão ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{MgCl}_2$) de acordo com Brookes e Powson (1981) e o P orgânico total conforme descrito por Bowman (1989), sendo a determinação do P nos extratos segundo a metodologia de Murphy e Riley (1962).

7.2.8 Análise das frações do nitrogênio orgânico

O fracionamento das formas orgânicas de N foi baseado na extração e quantificação dos compostos nitrogenados liberados por hidrólise ácida, baseando-se na técnica de degradação das proteínas descrita por Yonebayashi e Hattori (1980), conforme procedimentos descritos a seguir.

Em duas amostras de solo contendo cerca de 10 mg de N orgânico foram adicionadas de 3 gotas de octanol e submetidas à hidrólise, sendo uma com 20 mL de HCl 6,0 mol L⁻¹ durante o período 24 h, e outra, com 20 mL de HCl 1,0 mol L⁻¹ durante 3 h, ambas com aquecimento a 110 °C e sob refluxo em condensador. As frações de N-hidrolisado, N-NH₄⁺, N-hexosamina, N- α -amino foram determinadas no

hidrolisado neutro da primeira amostra, enquanto a fração de N-amida foi determinada na segunda. Após os procedimentos de hidrólise o material foi filtrado em filtro lento, coletando-se 60 mL do hidrolisado líquido e este foi neutralizado até pH 6,5 com NaOH, sendo o volume posteriormente completado a 100 mL com água destilada.

Para N-hidrolisado transferiu-se 5 mL da primeira amostra para tubos de digestão onde permaneceu a 180 °C por 20 min, seguida de 330 °C por 2 h ou até atingir cor verde-palha. Após o resfriamento adicionou-se 20 mL de água destilada e 5 mL de NaOH 10 mol L⁻¹ e iniciou-se a destilação, coletando-se a amônia em solução indicadora de ácido bórico e posterior titulação com H₂SO₄ 0,0025 mol L⁻¹. Para determinação do N-NH₄⁺, transferiu-se 10 mL da primeira amostra para frascos de destilação, juntamente com 70 mg de MgO calcinado e seguiu-se a destilação e posterior titulação de modo semelhante ao descrito anteriormente. Para determinação do N-amida transferiu-se 10 mL da segunda amostra para frascos de destilação, juntamente com 70 mg de MgO calcinado e seguiu-se destilação e posterior titulação de modo semelhante as anteriores. A fração N-amida foi calculada subtraindo-se o valor de N-NH₄⁺ mineral determinado nessa destilação, composto por N-NH₄⁺ mineral + N-amida. O valor de N-NH₄⁺ mineral em solução e aderido nas cargas negativas do solo foi determinado mediante extração com KCl 1,0 mol L⁻¹, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995) para análise de solo.

Para a fração N-hexosamina transferiu-se 10 mL da primeira amostra para frascos de destilação juntamente com 10 mL de uma solução tampão de fosfato-botarato com pH 11,2, seguida de posteriores destilação e titulação de forma semelhante às anteriores. Deste procedimento foi obtido N-hexosamina + N-NH₄⁺, onde o N-hexosamina foi calculado por subtração da fração N-NH₄⁺ determinado na segunda etapa.

Para determinação do N- α -amino foram transferidos 5 mL da segunda amostra para frascos de destilação, adicionando-se 1 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹ e seguiu-se aquecimento em banho-maria a temperatura de 100 °C até reduzir o volume para 2 a 3 mL. Após, resfriar-se o frasco, adicionou-se 500 mg de ácido cítrico e 100 mg de ninhidrina, aquecendo o extrato em banho-maria novamente por mais 1 min. Após este período agitou-se o frasco com movimento circular por alguns segundos, sem retirar do banho-maria, deixando-os por mais 10 min. Após resfriar, adicionou-se 10 mL de tampão fosfato-borato e 1,0 mL de NaOH 5 mol L⁻¹ e procedeu-se com o processo de destilação e titulação descritos anteriormente. O N-não identificado é

estimado pela subtração da soma das formas hidrolisadas de N orgânico do valor de N-hidrolisado determinado na primeira etapa, onde N-não identificado = N-hidrolisado - (N-NH₄⁺ + N-amida + N-hexosamina + N- α -amino).

7.2.9 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise da homogeneidade da variância e da normalidade. Depois de atendidos os pressupostos paramétricos foi realizada a análise de variância através do teste F, considerando o modelo experimental inteiramente casualizado para avaliação do efeito de tratamentos. Quando houve diferença significativa, o efeito dos tratamentos na interação foi comparado pelo teste Tukey ($P \leq 0,05$).

7.3 Resultados e discussão

A adubação por fertilizantes organominerais em diferentes doses de interação entre P×N não promoveram alterações nos teores de P total, orgânico e inorgânico no solo (Tabela 4). Os valores das significâncias (valor p) na comparação entre os três cultivos para estas formas de P foram de: 0,42, 0,22 e 0,26 para as formas de P total, P orgânico e P inorgânico, respectivamente. Lembrando, que a coleta do solo foi realizada após o período de crescimento das plantas em cada cultivo, sendo os valores representados pela média das três amostragens.

Dentre as formas de P avaliadas o P orgânico representou as menores proporções em média 22% do P total do solo (Tabela 4), sendo a maior parte do P em formas inorgânicas. O fato do fertilizante não alterar as formas de P no solo, pode ser explicado em virtude de as mesmas não apresentarem modificações em curto período de tempo, como experimento com vasos, uma vez que não foram aportadas altas quantidades de P orgânico ou mineral pelos fertilizantes organominerais. Tal como este solo traz alta CMAP e baixo P remanescente que ajudam a manter estes valores, quando os fertilizantes organominerais foram colocados no sulco de plantio e fora amostrado o solo de todo o vaso.

Tabela 4. Teor de fósforo (P) total, P orgânico total e P inorgânico no solo após cultivos sequenciais de milho em resposta a aplicação de fertilizante organomineral em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N). Médias dos três cultivos.

Dose de P (kg ha ⁻¹) P/N	Dose de N (kg ha ⁻¹)				
	0	50	100	150	200
	P total (mg kg ⁻¹)				
0	1486 ± 22	1479 ± 26	1496 ± 13	1491 ± 32	1488 ± 26
20	1491 ± 32	1483 ± 49	1506 ± 31	1496 ± 30	1519 ± 37
40	1488 ± 41	1496 ± 28	1481 ± 39	1503 ± 36	1536 ± 52
60	1501 ± 39	1480 ± 24	1488 ± 40	1529 ± 28	1527 ± 27
80	1509 ± 32	1497 ± 33	1499 ± 37	1507 ± 43	1531 ± 28
	P orgânico total (mg kg ⁻¹)				
0	297 ± 8	301 ± 14	333 ± 15	299 ± 14	313 ± 12
20	327 ± 10	299 ± 11	325 ± 13	306 ± 16	308 ± 11
40	312 ± 11	304 ± 16	322 ± 19	314 ± 21	321 ± 22
60	300 ± 9	318 ± 13	309 ± 9	320 ± 17	327 ± 15
80	317 ± 10	311 ± 10	340 ± 18	314 ± 16	306 ± 10
	*P inorgânico (mg kg ⁻¹)				
0	1189 ± 39	1178 ± 41	1163 ± 42	1192 ± 39	1175 ± 44
20	1164 ± 38	1184 ± 40	1181 ± 40	1190 ± 37	1211 ± 46
40	1176 ± 39	1192 ± 40	1159 ± 46	1189 ± 41	1215 ± 37
60	1201 ± 50	1162 ± 34	1179 ± 48	1209 ± 42	1200 ± 41
80	1192 ± 40	1186 ± 37	1159 ± 49	1193 ± 40	1225 ± 41

Médias ligadas por letras distintas (minúsculas nas horizontais e maiúsculas na vertical) diferem pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). * Valores calculados pela diferença entre o P total e P orgânico.

Houve efeito para teor P disponível pela adubação com fertilizantes organominerais em diferentes doses de interação entre P×N (Tabela 5). Os maiores teores de P disponível após o cultivo de milho ocorrem em doses a partir de 20×200 kg ha⁻¹ nos três cultivos. Particularmente, no cultivo 1 também houve aumento nos teores de P disponível nas doses de P de 40, 60 e 80 kg há⁻¹ na interação com a dose de 50 kg ha⁻¹ de N.

A baixa resposta do P disponível pode ser explicada pela sua forte interação com a fase mineral deste solo, pela adsorção específica formando complexos de alto grau de estabilidade (SHEN et al., 2011; SHUAI; ZINATI, 2009), tornando o P pouco disponível. A medida que ocorre a saturação dos sítios mais ávidos do solo pelo processo de adsorção, o P passa a formar ligações de menor energia em complexos do tipo monodentadas de maior labilidade e disponibilidade (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008; BARROW, 2015), explicando o aumento do P disponível nas maiores doses dos fertilizantes organominerais.

Tabela 5. Teor de fósforo (P) disponível do solo (mg kg^{-1}) após cultivos sequenciais de milho em resposta a aplicação de fertilizante organomineral em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N).

Dose de P (kg ha^{-1}) P/N	Dose de N (kg ha^{-1})				
	0	50	100	150	200
Cultivo 1					
0	4 ± 0,5	4 ± 0,4 C	4 ± 0,4 B	4 ± 0,4 C	4 ± 0,5 B
20	7 ± 1,5 b	8 ± 0,6 Bb	9 ± 1,1 Ab	12 ± 1,4 Ab	19 ± 1,9 Aa
40	6 ± 0,9 c	19 ± 3,2 Aa	8 ± 1,7 Ac	11 ± 1,2 Ab	21 ± 1,4 Aa
60	6 ± 0,7 b	19 ± 3,1 Aa	7 ± 0,9 Ab	8 ± 0,4 Ab	21 ± 1,6 Aa
80	7 ± 1,5 b	15 ± 3,2 Aa	8 ± 1,7 Ab	8 ± 0,6 Ab	18 ± 5,1 Aa
Cultivo 2					
0	4 ± 0,3 C	3 ± 0,3 B	3 ± 0,4 B	4 ± 0,3 B	4 ± 0,2 B
20	5 ± 0,6 Cc	7 ± 1,6 Ac	10 ± 2,4 Ab	11 ± 1,4 Ab	16 ± 1,1 Aa
40	11 ± 2,0 Bb	5 ± 0,9 Ac	6 ± 0,6 Ac	9 ± 0,9 Ab	17 ± 1,5 Aa
60	12 ± 1,2 Bb	5 ± 1,1 Ac	7 ± 0,8 Ac	12 ± 2,5 Ab	20 ± 1,5 Aa
80	20 ± 2,3 Aa	6 ± 1,1 Ac	10 ± 2,5 Ab	10 ± 1,2 Ab	16 ± 3,6 Aa
Cultivo 3					
0	4 ± 0,3 B	6 ± 0,4	6 ± 0,2 C	4 ± 0,3 B	4 ± 0,3 B
20	6 ± 0,4 Bc	7 ± 0,5 c	21 ± 1,3 Ab	19 ± 1,2 Ab	29 ± 0,7 Aa
40	20 ± 1,4 Ab	6 ± 0,5 c	21 ± 1,5 Ab	23 ± 1,5 Ab	28 ± 2,0 Aa
60	21 ± 2,1 Ab	6 ± 0,8 d	14 ± 1,4 Bc	19 ± 1,1 Ab	30 ± 2,0 Aa
80	24 ± 2,5 Ab	7 ± 0,8 d	16 ± 1,3 Bc	19 ± 1,1 Ac	29 ± 1,7 Aa

Médias ligadas por letras distintas (minúsculas na horizontal e maiúsculas na vertical) diferem pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Para o teor de N total e N-hidrolisado no solo não houve alteração para interação P×N em resposta da aplicação de fertilizante organominerais nos três cultivos (Tabela 6). Os valores de N-hidrolisado corresponderam em média a 84% do N total do solo. Utilizando este mesmo procedimento de análise Grohskopf et al. (2015), encontrou proporção de aproximadamente 78% de hidrólise na camada de 0 a 0,20 m em Latossolo Vermelho em condições de cultivo em plantio direto a campo.

O fato do método não extrair todo o N orgânico presente no solo pela hidrólise pode ser explicado pela existência de formas de maior grau de estabilidade, pela formação de complexos argilo-metal-húmus no solo, pela interação das moléculas orgânicas, cátions polivalentes e com os minerais da fração argila (GROHSKOPF et al., 2015), principalmente, de óxidos de Fe e Al predominantes no solo estudado. Estas formas de maior recalcitrância, preservados por mecanismos de proteção físico-químicos e estabilizados nos microagregados do solo, limitam a ação de hidrólise ácida pelo método empregado neste estudo. Podendo ser considerada esta parte do

N não solubilizado no método, como uma fração não lábil de alta complexidade e estabilidade no solo.

Tabela 6. Teor de nitrogênio (N) total e N hidrolisado⁽¹⁾ do solo após cultivos sequenciais de milho em resposta a aplicação de fertilizante organomineral em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N).

Dose de P (kg ha ⁻¹) P/N	Dose de N (kg ha ⁻¹)				
	0	50	100	150	200
Cultivo 1					
N total (mg kg ⁻¹)					
0	605 ± 2,9	569 ± 18,5	640 ± 38,9	605 ± 18,5	605 ± 2,9
20	602 ± 2,5	655 ± 14,4	605 ± 14,4	600 ± 8,2	582 ± 20,6
40	585 ± 10,4	578 ± 2,5	605 ± 14,4	615 ± 10,4	610 ± 4,1
60	608 ± 32,8	578 ± 10,0	620 ± 20,4	590 ± 20,4	620 ± 4,1
80	588 ± 2,5	600 ± 10,0	582 ± 2,5	682 ± 4,8	655 ± 14,4
N-hidrolisado (mg kg ⁻¹)					
0	514 ± 2,5	488 ± 15,7	544 ± 33,1	514 ± 15,7	514 ± 2,5
20	512 ± 2,1	557 ± 12,3	514 ± 12,3	510 ± 6,9	505 ± 17,5
40	497 ± 8,8	491 ± 2,1	514 ± 12,3	523 ± 8,8	518 ± 3,5
60	516 ± 27,8	491 ± 8,5	527 ± 17,4	512 ± 17,4	527 ± 3,5
80	499 ± 2,1	510 ± 8,5	498 ± 2,1	580 ± 4,1	557 ± 12,3
Cultivo 2					
N total (mg kg ⁻¹)					
0	558 ± 8,5	618 ± 8,5	608 ± 12,5	583 ± 8,5	608 ± 40,9
20	565 ± 10,4	536 ± 7,5	550 ± 4,1	535 ± 6,5	573 ± 8,5
40	575 ± 21,8	533 ± 4,8	570 ± 14,7	583 ± 9,5	565 ± 18,5
60	608 ± 16,5	533 ± 8,7	573 ± 31,2	590 ± 4,1	533 ± 18,5
80	563 ± 8,5	535 ± 8,7	565 ± 14,4	525 ± 18,5	578 ± 4,8
N-hidrolisado (mg kg ⁻¹)					
0	474 ± 7,3	525 ± 7,3	516 ± 10,6	495 ± 7,3	516 ± 34,8
20	480 ± 8,8	444 ± 6,4	468 ± 3,5	455 ± 5,5	487 ± 7,3
40	489 ± 18,5	453 ± 4,1	485 ± 12,5	495 ± 8,0	480 ± 15,7
60	516 ± 14,0	453 ± 7,4	487 ± 26,5	502 ± 3,5	463 ± 15,7
80	478 ± 7,3	455 ± 7,4	480 ± 12,3	446 ± 15,7	491 ± 4,1
Cultivo 3					
N total (mg kg ⁻¹)					
0	550 ± 15,8	558 ± 48,7	545 ± 31,0	568 ± 22,5	573 ± 18,4
20	547 ± 21,7	545 ± 18,5	605 ± 15,5	543 ± 30,4	660 ± 55,8
40	585 ± 29,0	585 ± 34,8	595 ± 37,5	585 ± 30,1	565 ± 24,0
60	578 ± 18,0	585 ± 10,8	588 ± 14,4	578 ± 25,3	595 ± 24,0
80	565 ± 20,6	540 ± 10,8	608 ± 30,9	598 ± 12,5	578 ± 23,2
N-hidrolisado (mg kg ⁻¹)					
0	468 ± 13,4	474 ± 41,4	463 ± 26,3	482 ± 19,1	487 ± 15,7
20	457 ± 18,5	463 ± 15,7	514 ± 13,2	461 ± 25,8	548 ± 47,5
40	497 ± 24,7	497 ± 39,5	506 ± 31,9	497 ± 25,6	480 ± 20,4
60	491 ± 15,3	497 ± 9,2	499 ± 12,2	491 ± 21,5	506 ± 20,3
80	480 ± 17,5	451 ± 9,2	516 ± 26,3	508 ± 10,6	491 ± 19,7

Médias ligadas por letras distintas (minúsculas na horizontal e maiúsculas na vertical) diferem pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). ⁽¹⁾ Quantidade de nitrogênio hidrolisado em hidrolisado neutro pela extração em KCl 6,0 mol L⁻¹.

Para as frações N orgânico nas formas de $N-NH_4^+$, N-hexosamina, N-amida, N- α -amino e N-não-identificado não houve efeito da interação entre $P \times N$ por fertilizantes organominerais na adubação nos três cultivos realizados, sendo seus valores representados pela média dos três cultivos (Tabela 7). Os valores das significâncias (valor p) na comparação entre os cultivos para estas formas de N orgânico foram de: 0,25, 0,32, 0,18, 0,11 e 0,16 para as formas $N-NH_4^+$, N-hexosamina, N-amida, N- α -amino e N-não-identificado, respectivamente.

Dentre as formas avaliadas de N orgânico o N-não identificado foi a que apresentou os maiores teores no solo (Tabela 7). Esta fração é considerada a de maior recalcitrância em relação as demais frações avaliadas, estando o N inserido em cadeias carbônicas de maior peso molecular e estabilidade, sendo de menor biodisponibilidade no solo (CAMARGO; GIANELLO; VIDOR, 1997).

No solo as formas de N orgânico seguem a seguinte ordem de grandeza: N-não identificado > $N-NH_4^+$ > N-amida > N- α -amino > N-hexosamina (Tabela 7). Ressaltando, que as formas de N-não identificado e N- α -amino representam as formas de N de maior estabilidade e recalcitrância, enquanto, as formas de $N-NH_4^+$, N-amida e N-hexosamina representam as formas de N orgânico de menor recalcitrância e maior biodisponibilidade no solo.

Provavelmente, a maior presença de N orgânico em forma mais recalcitrante está relacionada à menor velocidade de mineralização pelos microrganismos do solo, não podendo ser estas formas de N indicadoras de disponibilidade de N às plantas num curto prazo de tempo. Pode também ser somado a estas formas de N orgânico a parte do N-não hidrolisado pelo método (Tabela 6) caracterizado por um alto grau de complexidade e oclusão em microagregados do solo.

Nas formas de N de maior labilidade o $N-NH_4^+$ é de maior proporção, podendo ser considerada como uma fonte potencial de N disponível no solo (Tabela 7). Destaca-se que a forma de N-hexosamina representa os menores teores em relação as demais fontes de N, indicando maior biodisponibilidade no solo desta forma de N. Pode-se inferir que dentre as formas lábeis de N orgânico de N-hexosamina e N-amida, com os menores teores em relação as demais frações, demonstram menor limitação a acessibilidade dos microrganismos decompositores. Pode-se inferir que a aplicação simultânea destes elementos na adubação não promove alterações significativas na dinâmica do N no solo.

Tabela 7. Formas nitrogênio orgânico nas (mg kg^{-1}) do solo após cultivos sequenciais de milho em resposta a aplicação de fertilizante organomineral em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N). Médias dos três cultivos.

Dose de P (kg ha^{-1}) P/N	Dose de N (kg ha^{-1})				
	0	50	100	150	200
N-NH ₄ ⁺					
0	101 ± 5	99 ± 2	105 ± 5	111 ± 3	110 ± 4
20	109 ± 3	112 ± 2	110 ± 1	104 ± 2	110 ± 2
40	109 ± 2	101 ± 5	117 ± 2	111 ± 1	115 ± 2
60	108 ± 2	102 ± 2	101 ± 4	113 ± 2	116 ± 2
80	105 ± 2	113 ± 2	106 ± 1	107 ± 2	114 ± 3
N-hexosamina					
0	15 ± 4	10 ± 2	15 ± 3	9 ± 2	13 ± 2
20	8 ± 1	11 ± 1	10 ± 1	9 ± 1	10 ± 2
40	10 ± 3	10 ± 2	10 ± 2	11 ± 1	12 ± 2
60	11 ± 2	10 ± 1	15 ± 3	10 ± 2	13 ± 3
80	15 ± 2	8 ± 1	9 ± 1	10 ± 1	11 ± 1
N-amida					
0	60 ± 2	56 ± 2	62 ± 2	61 ± 4	62 ± 2
20	62 ± 4	64 ± 3	61 ± 2	62 ± 3	62 ± 2
40	62 ± 3	57 ± 2	62 ± 3	59 ± 2	62 ± 3
60	63 ± 2	57 ± 3	62 ± 4	60 ± 2	60 ± 3
80	62 ± 3	60 ± 3	61 ± 2	60 ± 4	58 ± 2
N-α-amino					
0	17 ± 2	19 ± 3	21 ± 2	21 ± 2	17 ± 2 B
20	17 ± 2	22 ± 2	19 ± 2	20 ± 2	19 ± 2 B
40	22 ± 2 b	20 ± 2 b	20 ± 1 b	19 ± 2 b	30 ± 3 Aa
60	20 ± 3 b	20 ± 2 b	20 ± 2 b	23 ± 3 b	29 ± 3 Aa
80	19 ± 2 b	20 ± 2 b	22 ± 2 b	23 ± 2 b	29 ± 2 Aa
N-não-identificado					
0	293 ± 8	305 ± 23	303 ± 22	293 ± 15	304 ± 21
20	290 ± 10	289 ± 13	298 ± 11	283 ± 17	306 ± 22
40	292 ± 19	293 ± 16	296 ± 18	310 ± 14	281 ± 11
60	306 ± 19	293 ± 11	313 ± 20	292 ± 14	291 ± 12
80	285 ± 12	279 ± 11	298 ± 14	309 ± 12	304 ± 14

Médias ligadas por letras distintas (minúsculas na horizontal e maiúsculas na vertical) diferem pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Assim, tanto o N quanto o P no solo não tiveram significativas alterações em suas formas pelo efeito da interação entre P×N em diferentes concentrações em fertilizantes organominerais. Estes resultados indicam que a aplicação simultânea destes elementos no solo via fertilizantes não interfere significativamente em suas respectivas dinâmicas, nas condições deste experimento.

Na planta houve resposta para interação entre P×N em fertilizante organomineral na produção de biomassa seca (BS) da parte aérea no milho, com maior resposta no primeiro cultivo (Tabela 8). Os maiores incrementos no cultivo 1

ocorrem a partir da interação P×N de 20×100 kg ha⁻¹, com ênfase nas interações 80×150 e 80×200 kg ha⁻¹ com os maiores valores de BS. Este mesmo efeito é verificado pela soma da produção de BS dos três cultivos realizados. A mesma concentração de 20 kg ha⁻¹ no fertilizante organomineral foi a que iniciou a interação no incremento do teor de P disponível no solo (Tabela 5).

Tabela 8. Biomassa seca da parte aérea de milho em três cultivos sequenciais com 40 dias cada em Latossolo Vermelho Distroférico em resposta a aplicação de fertilizante organomineral a base de cama de aves em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N).

Fósforo (kg ha ⁻¹)	Dose (kg ha ⁻¹) Nitrogênio					
	P/N	0	50	100	150	200
Cultivo 1 (g/vaso)						
0		11,0 ± 0,5 C	14,9 ± 0,4 B	16,5 ± 1,4 B	16,8 ± 1,5 C	21,5 ± 1,4 B
20		46,0 ± 2,8 Bb	47,6 ± 3,3 Ab	67,6 ± 3,1 Aa	76,8 ± 4,9 Ba	77,7 ± 4,5 Aa
40		49,6 ± 1,2 Bc	57,6 ± 3,9 Abc	70,6 ± 1,1 Aab	80,0 ± 3,0 Ba	79,6 ± 6,8 Aa
60		62,6 ± 4,0 Ab	59,4 ± 3,2 Ab	75,7 ± 4,9 Aa	74,6 ± 6,5 Ba	84,9 ± 1,6 Aa
80		58,9 ± 2,3 Acd	48,5 ± 2,3 Ad	64,0 ± 1,2 Ac	94,4 ± 3,5 Aa	84,3 ± 2,5 Aa
Cultivo 2 (g/vaso)						
0		6,3 ± 0,3 Bb	7,9 ± 0,3 a	9,3 ± 0,2 a	9,9 ± 0,6 a	9,5 ± 0,4 a
20		8,8 ± 0,3 A	8,9 ± 0,5	8,1 ± 0,3	9,4 ± 0,6	9,2 ± 0,6
40		8,3 ± 0,2 A	8,4 ± 0,3	9,6 ± 0,6	8,8 ± 0,2	9,6 ± 0,4
60		9,1 ± 0,4 A	7,9 ± 0,3	8,7 ± 0,4	9,3 ± 0,6	8,9 ± 0,3
80		9,1 ± 0,2 A	8,7 ± 0,6	8,7 ± 0,5	9,2 ± 0,6	10,0 ± 0,6
Cultivo 3 (g/vaso)						
0		5,6 ± 0,4	5,8 ± 0,4	5,8 ± 0,4	5,9 ± 0,2	6,1 ± 0,3
20		6,7 ± 0,4	7,3 ± 0,2	7,7 ± 0,4	7,5 ± 1,4	8,0 ± 0,7
40		7,2 ± 0,2	8,0 ± 0,7	7,2 ± 0,3	7,9 ± 0,5	7,4 ± 0,3
60		7,8 ± 0,5	6,9 ± 0,5	6,8 ± 0,4	7,9 ± 0,2	7,5 ± 0,2
80		8,1 ± 0,2	7,2 ± 0,3	7,4 ± 0,6	7,2 ± 0,9	8,2 ± 0,3
Soma dos cultivos (g/vaso)						
0		22,7 ± 1,1 B	28,3 ± 1,0 B	31,3 ± 1,9 C	32,4 ± 2,4 C	37,1 ± 2,2 B
20		61,5 ± 3,4 Ab	63,8 ± 4,1 Ab	83,4 ± 3,9 Aa	93,7 ± 6,7 Ba	94,9 ± 5,6 Aa
40		65,2 ± 1,6 Ab	74,0 ± 4,9 Aab	87,4 ± 2,1 Aa	96,8 ± 3,8 Ba	96,6 ± 7,6 Aa
60		79,5 ± 5,0 Ab	74,2 ± 3,9 Ab	91,2 ± 5,5 Aa	91,8 ± 7,2 Ba	101,3 ± 2,0 Aa
80		76,3 ± 2,7 Ab	64,4 ± 3,3 Ab	70,1 ± 2,4 Bb	110,8 ± 4,9 Aa	98,5 ± 3,4 Aa

Médias ligadas por letras distintas (minúsculas na horizontal e maiúsculas na vertical) diferem pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Nos cultivos 2 e 3 com os menores valores de produção de BS, houve apenas efeito significativo no cultivo 2 no tratamento controle sem a aplicação de P e N (0×0 kg ha⁻¹) com o menor valor de BS (tabela 8). A partir do cultivo 2 pode estar ocorrendo limitação nutricional as plantas, principalmente pelo N em relação ao P que demonstra

níveis adequados de P disponível para as maiores doses (Tabela 5). Ressaltando, que todos os demais nutrientes com exceção dos elementos em teste, foram aplicados em nível ótimo no solo para não apresentar deficiência nas plantas durante os três cultivos.

O efeito da interação entre P×N no primeiro cultivo na produção de BS, indica que há efeito sinérgico da adição simultânea destes dois elementos no solo. Entretanto, é importante distinguir sobre os processos de interação ou limitação entre eles, pois, tanto a adição simultânea quando individual, independente da limitação, se obtém resposta no desempenho das culturas, sendo a adição simultânea podendo ou não somar sobre as respostas individuais de cada elemento (HARPOLE et al., 2011).

Para eficiência dos nutrientes isoladamente na interação, a maior eficiência é demonstrada pelo P em relação ao N (Tabela 9). Esta maior relevância do P pode ser explicada por este nutriente estar ligado aos componentes estruturais e regular diversos processos na planta, regulando a absorção de N de acordo com a demanda da taxa de crescimento vegetal (GROOT et al., 2003). Portanto, o P atuaria na regulação da quantidade demandada de N que será absorvida pela planta estabelecendo o caráter de necessidade.

Tabela 9. Eficiência da interação para a produção de biomassa seca (BS) da parte aérea de milho. Valores calculados com base na soma BS dos três cultivos de milho.

Fósforo (kg ha ⁻¹)	Dose (kg ha ⁻¹) Nitrogênio				
	P/N	0	50	100	150
Eficiência da contribuição de N (%)					
0	---	---	---	---	---
20	*	6 ± 0,8	56 ± 1,7	83 ± 2,2	86 ± 2,6
40	*	21 ± 1,1	52 ± 1,4	74 ± 2,4	74 ± 2,1
60	*	- 12 ± 0,9	21 ± 0,9	22 ± 1,0	38 ± 1,5
80	*	- 22 ± 0,7	12 ± 0,7	64 ± 2,5	41 ± 1,8
Eficiência da contribuição de P (%)					
0	---	*	*	*	*
20	---	634 ± 19	606 ± 18	632 ± 20	401 ± 12
40	---	816 ± 25	652 ± 21	664 ± 24	414 ± 15
60	---	819 ± 27	696 ± 26	612 ± 18	446 ± 17
80	---	645 ± 19	451 ± 14	808 ± 30	426 ± 21

* Dose de referência para o cálculo da eficiência do elemento, valor descontado da interação para o cálculo da eficiência em separado do elemento em avaliação.

A maior eficiência do P é demonstrada a partir das doses 20 kg ha⁻¹ de P na interação com doses de N a partir de 100 kg ha⁻¹ (Tabela 9). Enquanto, para o N as maiores eficiências foram a partir da dose de 100 kg ha⁻¹ na interação com o P a partir da dose 20 kg ha⁻¹, indicando maior dependência do P para que ocorra respostas significativas no crescimento das plantas.

Ambos os nutrientes são importantes na nutrição vegetal e suas deficiências no solo ocasionam em redução significativa no rendimento das culturas. Mesmo o P sendo menos exigido em relação ao N para no desenvolvimento vegetal, sua forte interação com a fase mineral do solo faz com que atinja caráter de deficiência mais rapidamente (BOLAN et al., 2013) e a sua grande importância em diversos processos bioquímicos e metabólicos nas plantas acaba limitando mais facilmente o crescimento vegetal (GROOT et al., 2003; AGREN; WETTERSTEDT; BILLBERGE, 2012). O que explicaria a maior resposta para N em doses a partir de 20 kg ha⁻¹ de P, enquanto, para P as maiores respostas ocorrem nas maiores doses de N pelo caráter de necessidade das plantas pelo maior crescimento.

Para acúmulo de P na parte aérea das plantas houve resposta significativa nos três cultivos, com os maiores teores no primeiro cultivo (Figura 10). No cultivo 1, os maiores incrementos ocorrem em doses de interação entre P×N a partir de 20×150 kg ha⁻¹, sendo o maior acúmulo demonstrado na maior dose de 20×200 kg ha⁻¹. Este mesmo efeito é verificado pela soma dos acúmulos dos três cultivos realizados.

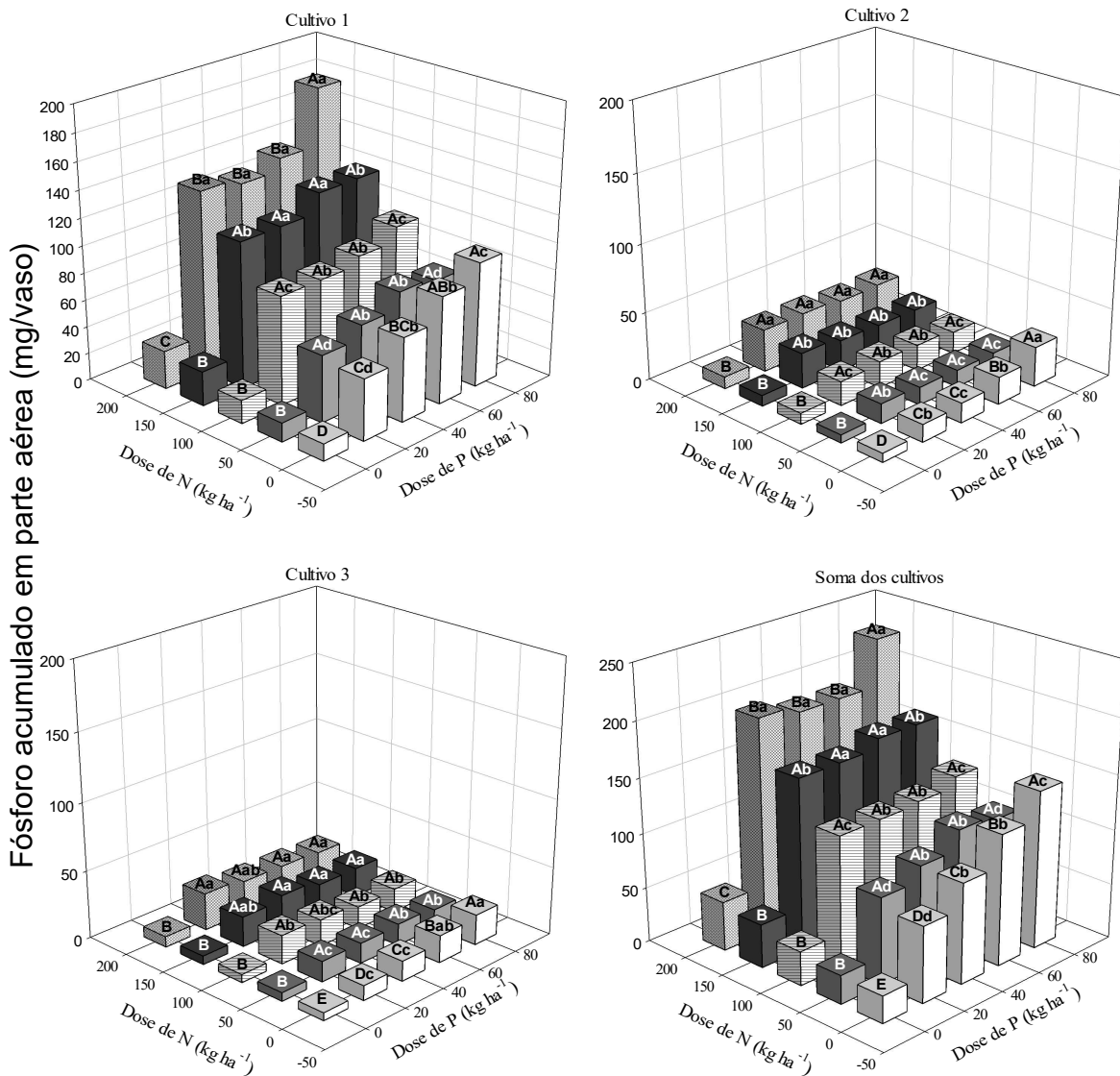


Figura 10. Acúmulo de fósforo (P) na parte aérea de milho em três cultivos sequenciais com 40 dias cada em Latossolo Vermelho Distroférico em resposta a aplicação de fertilizante organomineral a base de cama de aves em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N). Letras minúsculas representam a diferença entre doses de N (eixo “y”) dentro da dose de P e maiúsculas a diferença entre as doses de P (eixo “x”) dentro da dose N pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Nos demais cultivos com menores valores de acúmulo de P, os incrementos ocorrem em doses entre P×N a partir de 20×200 e 20×50 kg ha⁻¹ nos cultivos 2 e 3, respectivamente (Figura 10). Pode ser observado que os maiores incrementos no acúmulo de P na planta ocorre a partir de doses maiores de N (150 kg ha⁻¹) com fertilizantes organominerais.

Particularmente, a dose de 50 kg ha⁻¹ de N com fertilizantes organominerais promove efeito antagônico no acúmulo de P em todas as doses (20, 40, 60 e 80 kg ha⁻¹), com resposta semelhante as doses de P sem a interação do N no fertilizante (Figura 10). Portanto, pode-se inferir que para o acúmulo de P o efeito sinérgico das doses de P ocorrem a partir da interação com a dose de 100 kg ha⁻¹ de N.

No acúmulo de P nas plantas a maior eficiência é demonstrada pelas doses P do que pela N aplicado via fertilizantes organominerais, pois determinará de forma direto ou indireta a velocidade da demanda de N de acordo com a taxa de crescimento das plantas (Tabela 10).

Tabela 10. Eficiência da interação para o acúmulo de fósforo (P) da parte aérea de milho. Valores calculados com base na soma dos acúmulos de P dos três cultivos de milho.

Fósforo (kg ha ⁻¹)	Dose (kg ha ⁻¹) Nitrogênio					
	P/N	0	50	100	150	200
Eficiência da contribuição de N (%)						
0	---	---	---	---	---	---
20	*	22 ± 0,7	111 ± 5	194 ± 6	284 ± 11	
40	*	0,8 ± 0,02	42 ± 1	97 ± 6	146 ± 9	
60	*	-10 ± 0,4	2 ± 0,2	48 ± 2	74 ± 7	
80	*	-32 ± 1,1	-11 ± 0,9	18 ± 1	74 ± 4	
Eficiência da contribuição de P (%)						
0	---	*	*	*	*	
20	---	4100 ± 123	1427 ± 56	797 ± 32	765 ± 22	
40	---	5092 ± 201	1431 ± 51	799 ± 28	729 ± 27	
60	---	6438 ± 195	1464 ± 49	860 ± 34	728 ± 30	
80	---	6077 ± 241	1697 ± 59	858 ± 41	940 ± 44	

* Dose de referência para o cálculo da eficiência do elemento, valor descontado da interação para o cálculo da eficiência em separado do elemento em avaliação.

Para o acúmulo de N na parte aérea das plantas houve efeito significativo de interação nos cultivos 1 e 3 (Figura 11). No cultivo 1 com os maiores valores, ocorre incremento no acúmulo de N em doses de interação entre P×N a partir de 40×50 kg ha⁻¹, com o maior acúmulo demonstrado na maior dose de 80×200 kg ha⁻¹. Este mesmo efeito é verificado pela soma dos acúmulos dos três cultivos realizados. Enquanto, no cultivo 3 a interação entre P×N ocorre nas doses a partir de 20×0,

demonstrando a forte influência do P sobre a absorção de N quando comparado a ausência de N.

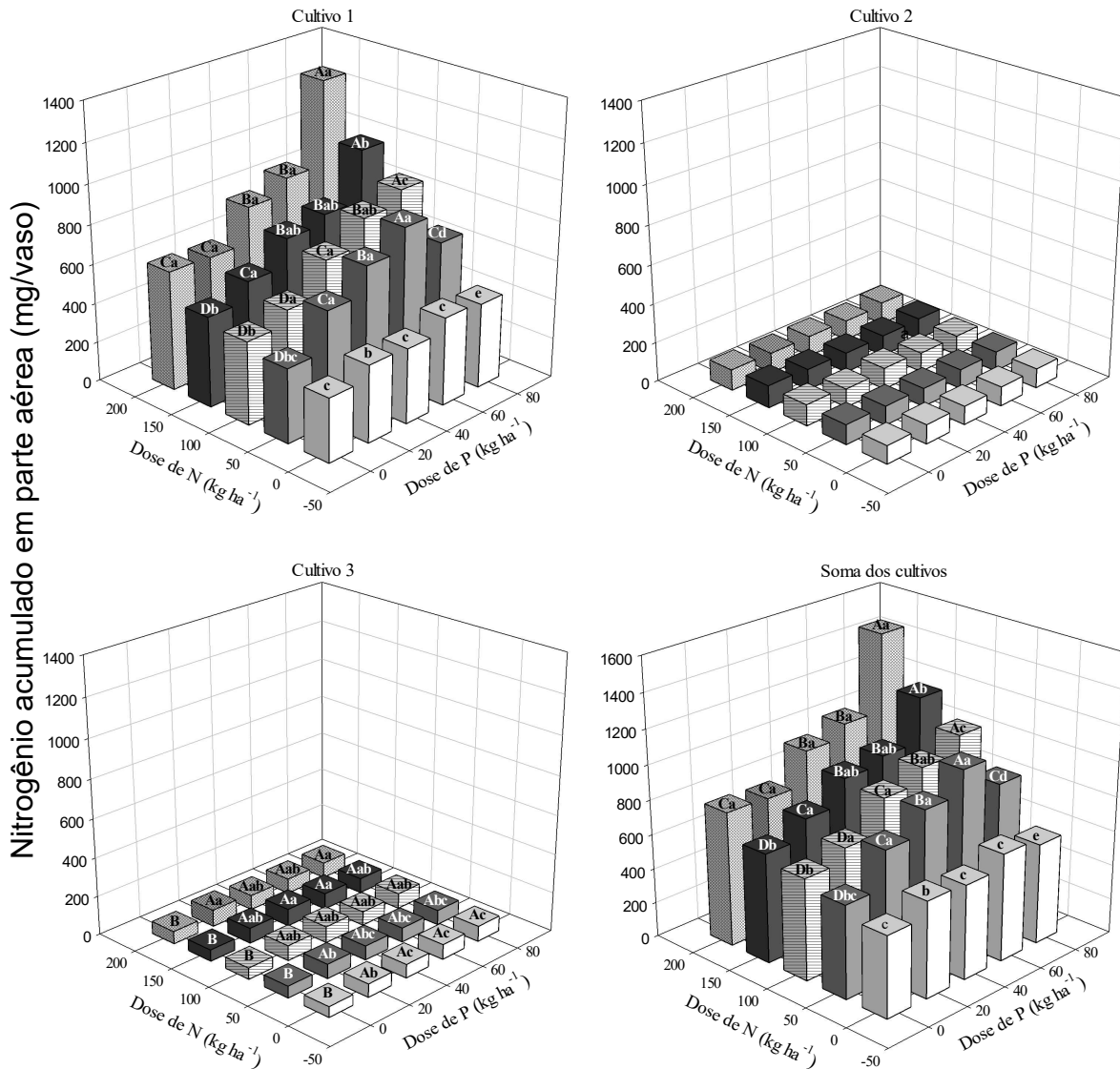


Figura 11. Acúmulo de nitrogênio (N) na parte aérea de milho em três cultivos sequenciais com 40 dias cada em Latossolo Vermelho Distroférico em resposta a aplicação de fertilizante organomineral a base de cama de aves em diferentes doses de interação entre fósforo e nitrogênio (P×N). Letras minúsculas representam a diferença entre doses de N (eixo “y”) dentro da dose de P e maiúsculas a diferença entre as doses de P (eixo “x”) dentro da dose N pelo teste de Tukey (p≤0,05).

A maior absorção de N no primeiro cultivo pode ser justificada em razão de independente da concentração de interação do fertilizante organomineral, as formas de amônio (N-NH₄⁺) e nitrato (N-NO₃⁻) serem pouco adsorvidas pelas cargas dos colóides do solo e, quando adsorvidas formam ligações de baixa energia do tipo eletrostática, prevalecendo na fase líquida do solo (ZHANG et al., 2011), não tendo, restrições para a absorção da planta e apresentando baixo efeito residual.

Para o acúmulo de N na parte aérea das plantas a maior eficiência é demonstrada pelo N do que em relação ao P (Tabela 11). No caso do N, os resultados demonstram uma forte influência de P sobre a sua absorção pelas plantas, mesmo sendo um elemento absorvido em menor quantidade comparativamente, o que pode ser justificado pelos altos índices de eficiência do P. Assim, para o N a eficiência na planta está intimamente ligada ao aporte de P, sendo a eficiência de N maior em doses a partir de 50 kg ha⁻¹ de N na dose de 80 kg ha⁻¹ de P, enquanto, a eficiência de P para o acúmulo de N ocorre em doses a partir de 20 kg ha⁻¹ de P.

Tabela 11. Eficiência da interação para o acúmulo de nitrogênio (N) da parte aérea de milho. Valores calculados com base na soma dos acúmulos de N dos três cultivos de milho.

Fósforo (kg ha ⁻¹)	Dose (kg ha ⁻¹) Nitrogênio				
	P/N	0	50	100	150
Eficiência da contribuição de N (%)					
0	---	---	---	---	---
20	*	216 ± 6	124 ± 5	208 ± 7	242 ± 9
40	*	449 ± 12	420 ± 14	455 ± 18	558 ± 22
60	*	257 ± 11	211 ± 8	200 ± 6	270 ± 13
80	*	241 ± 9	424 ± 16	552 ± 21	822 ± 26
Eficiência de contribuição de P (%)					
0	---	*	*	*	*
20	---	310 ± 10	65 ± 3	66 ± 3	-3 ± 0,1
40	---	506 ± 15	226 ± 7	153 ± 6	59 ± 3
60	---	709 ± 21	300 ± 15	180 ± 7	83 ± 5
80	---	454 ± 13	385 ± 19	337 ± 16	227 ± 11

* Dose de referência para o cálculo da eficiência do elemento, valor descontado da interação para o cálculo da eficiência em separado do elemento em avaliação.

A importância do P para a absorção e acúmulo de N pode ser em virtude da sua importância sobre diversos processos bioquímicos e metabólicos nas plantas. Sabe-se que a limitação de P no solo ocasiona em alterações na absorção e assimilação do N pelas plantas (AGREN; WETTERSTEDT, BILLBERGE, 2012). Para este efeito existem várias hipóteses, podendo ser pela limitação da absorção do NO_3^- pelas raízes que é um processo ativo e requer energia metabólica (GNIAZDOWSKA; RYCHTER, 1999); redistribuição e formação de órgãos de menor concentração de N na planta (GROOT et al., 2003); ou, pela diminuição da energia metabólica disponível pela menor concentração de ATP ou menor atividade da enzima ATPase (RUFTY et al., 1993; GNIAZDOWSKA; RYCHTER, 2000).

O efeito da interação P×N por fertilizantes organominerais na forma de complexo para N e P é alterada ao longo do tempo de cultivo, com padrões de resposta distintos entre os dois elementos. As interações proporcionadas entre os elementos e concentração de cada elemento na interação promove como resultado uma combinação sinérgica ou antagônica, influenciando direta ou indiretamente diversos processos no solo e na planta que interferem na resposta das plantas.

Em condições de níveis adequados ou altos de P na planta ocorre aumento da absorção e acúmulo de N, enquanto que, o incremento da dose de N estimula a absorção do P. Portanto, há efeito de interação P×N pela adubação simultânea com efeito mais pronunciado sobre as plantas do que em relação a dinâmica destes elementos no solo. Entretanto, os mecanismos envolvidos nesta interação entre estes elementos não são ainda completamente esclarecidos.

7.4 Conclusões

No solo não houve efeito da interação sobre as formas de N orgânico, sendo apenas demonstradas diferenças no P disponível na dose interação P×N de 20×200 kg ha⁻¹ com os maiores teores.

Houve efeito de interação na produção de biomassa seca apenas no primeiro cultivo, com os maiores incrementos nas doses de interação P×N a partir de 20×100 kg ha⁻¹.

No teor e acúmulo de N houve maior resposta no primeiro cultivo, enquanto, para o P houve resposta significativa nos três cultivos.

Os incrementos no acúmulo de P e N na parte aérea das plantas são demonstradas quando a interação entre P×N pelo fertilizante organomineral ocorre em doses iguais ou superiores à 20×150 e 40×50 kg ha⁻¹, respectivamente.

7.5 Referências

AGREN GI, WETTERSTEDT M, BILLBERGE MF. Nutrient limitation on terrestrial plant growth – modeling the interaction between nitrogen and phosphorus. **New Phytologist**, v.194, p.953–960, 2012. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2012.04116.x

ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa-MG, v.25, p.27-32, 2000. (Boletim Informativo).

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Setor de Fertilizantes: Anuário Estatístico 2016**. São Paulo–SP. 2016. Disponível em: < <http://anda.org.br/pdfs/INDICE-ANUARIO-2016.pdf> >. Acesso em: 12 jul. 2017.

BOLAN, N. et al. Phosphorus–arsenic interactions in variable-charge soils in relation to arsenic mobility and bioavailability. **Science of the Total Environment**, v.463–464, p.1154–1162, 2013. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.04.016

BOWMAN, R.A. A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and diluted base for soil organic phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, v.53. p.326-366, 1989.

BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. **Revista Ceres**, v.113, p.73–85, 1974.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **Journal of Science and Food Agriculture**, London, v 32, p. 671–674, 1981.

CARVALHO, W. A.; ESPÍNDOLA, C. R.; PACCOLA, A. A. **Levantamento de solos da fazenda Lageado**. Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu-SP, 1983. 95p. (Boletim Científico, n.1).

CAMARGO, F. A. O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Tempo de hidrólise e concentração de ácido para fracionamento do nitrogênio orgânico do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, p221–227, 1997.

CHEN, H. et al. Phosphorus addition affects soil nitrogen dynamics in a nitrogen-saturated and two nitrogen-limited forests. **European journal of Soil Science**, v.68, p. 472–479, 2017. DOI: 10.1111/ejss.12428

CORRÊA, J. C. et al. Organic, organomineral, and mineral fertilizers with urease and nitrification inhibitors for wheat and corn under no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.903–912, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X201600090000x

CUNHA, J. C. et al. Quantification of permanent and variable charges in reference soils of the state of pernambuco, brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1162–1169, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000400012

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Macronutrient-Use Efficiency and Changes in Chemical Properties of an Oxisol as Influenced by Phosphorus Fertilization and Tropical Cover Crops **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.35, p.1227-1246, 2014. DOI: 10.1080/00103624.2013.874030

GNAZDOWSKA, A.; RYCHTER, A. M. Low phosphate nutrition alters bean plants' ability to assimilate and translocate nitrate. **Journal of Plant Nutrition**, v.22, p.551–563, 1999. DOI: 10.1080/01904169909365651

GNAZDOWSKA, A.; RYCHTER, A. M. Nitrate uptake by bean (*Phaseolus vulgaris* L.) roots under phosphate deficiency. **Plant Soil**, v.226, p.79–85, 2000.

GROHSCOPF, M. A. et al. Organic Nitrogen in a Typic Hapludox Fertilized with Pig Slurry. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.1, p.127–139, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20150080

GRAETZ, D. A.; NAIR, V. D. Phosphorus sorption isotherm determination. In. PIERZYNSKI GM (ed). **Methods of phosphorus analysis for soils, sediments and Waters**. USDA-CSREES, Regional Committee, 2000. p. 35-38. (Southern cooperatives series bull, 396)

GROOT, C. et al. Interaction of nitrogen and phosphorus nutrition in determining growth. **Plant and Soil**, 248, 257–268, 2003.

HARPOLE, S. et al. Nutrient co-limitation of primary producer communities. **Ecology Letters**, v.14, p.852–862, 2011. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2011.01651.x

MAKHANI, M.; ISAAC, M. E. Rhizosphere dynamics under nitrogen-induced root modification: The interaction of phosphorus and calcium. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.177, p. 624–632, 2014. DOI: 10.1002/jpln.201300381

MONTALVO, D.; DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Agronomic Effectiveness of Granular and Fluid Phosphorus Fertilizers in Andisols and Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v.79, n.2, p.577–584, 2015. DOI: 10.2136/sssaj2014.04.0178

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta.**, v.27, p.31–36, 1962.

PAUNGFOO-LONHIENNE, C. et al. Past, present and future of organic nutrients. **Plant Soil**, v.359, p.1–18, 2012. DOI: 10.1007/s11104-012-1357-6

PLAZA, C. et al. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration. **Soil Biology and Biochemistry**, v.57, p.124–134, 2013. DOI: 10.1016/j.soilbio.2012.07.026

RAIJ, B. Van. et al. **Recomendação de adubação e calagem para o estado do São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1997. 300p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. Van. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285p.

RUFTY, T. W. et al. Phosphate regulation of nitrate assimilation in soybean. **Journal of Experimental Botany**, v.44, p.879–891, 1993. DOI: 10.1093/jxb/44.5.879

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C. KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, n.2, p.576–586, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000200049

SATTARI, S. Z. et al. Crop yield response to soil fertility and N, P, K inputs in different environments: Testing and improving the QUEFTS model. **Field Crops Research**, v.157, p.35–46, 2014. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.12.005

SETIYONO, T. et al. Estimating maize nutrient uptake requirements. **Field Crops Research**, v.118, p.158–168, 2010. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.05.006

SHEN, J. et al. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v.156, p.997–1005, 2014. DOI: 10.1104/pp.111.175232

SHUAI, X.; ZINATI, G. Proton charge and adsorption of humic acid and phosphate on goethite. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n.6, p.2013–2020, 2009. DOI:10.2136/sssaj2009.0119

TEDESCO, M., J. et al. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 212 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

YOKOYAMA, D.; IMAI, N.; KITAYAMA, K. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on the activities of four different classes of fine-root and soil phosphatases in Bornean tropical rain forests. **Plant and Soil**, v.416, p. 463–476, 2017. DOI: 10.1007/s11104-017-3225-x

YONEBAYASHI, H.; HATTORI, T. Improvements in the method for fractional determination of soil organic nitrogen. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.32, p.189–200, 1980.

ZHANG, K. et al. A dynamic model for the combined effects of N, P and K fertilizers on yield and mineral composition; description and experimental test. **Plant and Soil**, v.298, p.81–98, 2007. DOI: 10.1007/s11104-007-9342-1

ZHANG, J. B. et al. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil nitrogen transformations. **European Journal of Soil Science**, v.63, p.75–85, 2011. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2011.01410.x

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste experimento indicam que há efeito de interação entre P e N no solo e na planta, com dinâmica distinta dos nutrientes quando comparado à aplicação isolada de cada nutriente. No caso do solo, o efeito da interação entre os dois nutrientes é mais evidente na região do solo ao redor dos grânulos dos fertilizantes, com respostas distintas sobre a disponibilidade e a mobilidade destes nutrientes.

Diferentes doses de N interagindo com a dose de P, e diferentes doses de P interagindo com a dose de N nos formulados de fertilizante organomineral produzidos promoveram diferentes respostas sobre a mobilidade disponibilidade de cada nutriente nas placas de petri, representando a porção do solo correspondente a região ao redor dos grânulos dos fertilizantes organominerais formulados. Em geral, o N inorgânico demonstrou mobilidade e disponibilidade até a seção do solo avaliada nas placas de petri mais afastada do ponto central de deposição dos fertilizantes. Enquanto para o P, a mobilidade e a disponibilidade ocorreram nas primeiras seções avaliadas nas placas de petri mais próximas aos grânulos dos fertilizantes.

Na planta houve maior efeito de resposta da interação entre P e N pelo fertilizante organomineral do que em relação ao solo. Nos três cultivos sequenciais de milho nas condições de vasos em casa de vegetação houve resposta das doses de interação para ambos os nutrientes. Porém, houve respostas distintas sobre as doses de interação para cada nutriente, sendo o efeito da interação mais pronunciado ou regulado pelo nutriente P nas doses de interação, com resposta significativa a partir da menor dose de P em interação (20 kg ha^{-1}).

Os resultados obtidos nos experimentos demonstraram que houve o efeito de interação entre P e N tanto no solo quanto na planta pela aplicação simultânea destes nutrientes pelos fertilizantes organominerais produzidos. Porém, os mecanismos de interação pela adição simultânea destes nutrientes não são completamente esclarecidos pela ciência, sendo necessário a realização de mais estudos para o entendimento da dinâmica da interação entre P e N no sistema solo-planta.

O entendimento desta interação permitirá a otimização da adubação por estes elementos nos sistemas agrícola, no desenvolvimento e na elaboração de formulações de fertilizantes organominerais mais eficientes.

9 REFERÊNCIAS

ABISOLO – Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal. **Anuário brasileiro de tecnologia em nutrição vegetal**. São Paulo-SP. 2015.

Disponível em: < <http://abisolo.com.br/publicacoes.php>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Setor de Fertilizantes:**

Anuário Estatístico 2016. São Paulo–SP. 2016. Disponível em: <

<http://anda.org.br/pdfs/INDICE-ANUARIO-2016.pdf> >. Acesso em: 12 jul. 2017.

AGREN, G. I.; WETTERSTEDT, M.; BILLBERGE, M. F. Nutrient limitation on terrestrial plant growth – modeling the interaction between nitrogen and phosphorus.

New Phytologist, v.194, p.953–960, 2012. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2012.04116.x

ALCÂNTARA, M. A. K.; CAMARGO, O. A. Movimentação de nitrato em horizonte superficial e subsuperficial de Latossolo e Nitossolo com cargas variáveis. **Pesquisa**

Agropecuária Brasileira, v.45, n.1, p.81–88, 2010. DOI: 10.1590/S0100-204X2010000100011

ANTIL, R. S. et al. Predicting nitrogen and carbon mineralization of composted manure and sewage sludge in soil. **Compost Science & Utilization**, v.19, p.33–43,

2011. DOI: 10.1080/1065657X.2011.10736974

ANTILLE, D.L.; SAKRABANI, R.; GODWIN, R.J. Nitrogen Release Characteristics from Biosolids-Derived Organomineral Fertilizers. **Communication Soil Science**

and Plant Analysis, v.45, p.1605–1621, 2014a. DOI:

10.1080/00103624.2014.907915

ARAI, Y.; SPARKS, D. L. Phosphate reaction dynamics in soils and soil minerals: a multiscale approach. **Advances in Agronomy**, v.94, p.135–179, 2007. DOI:

10.1016/S0065-2113(06)94003-6

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2nd. New York, John & Wiley, 1995. 384p.

BARRON, A. R.; PURVES, D. W.; HEDIN, L. O. Facultative nitrogen fixation by canopy legumes in a lowland tropical forest. **Oecologia**, v.165, p.511–520, 2011. DOI: 10.1007/s00442-010-1838-3

BARROW, N. J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **European Journal of Soil Science**, v.66, p.9–18, 2015. DOI: 10.1111/ejss.12198_2

BINKLEY, D.; MATSON, P. Ion-exchange resin bag method for assessing forest soil-nitrogen availability. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.1050–1052, 1983.

BOARETTO, R. M. et al. Absorption of $^{15}\text{NH}_3$ volatilized from urea by *Citrus* trees. **Plant Soil**, v.365, p.283–290, 2013. DOI: 10.1007/s11104-012-1380-7

BOLAN, N. et al. Phosphorus–arsenic interactions in variable-charge soils in relation to arsenic mobility and bioavailability. **Science of the Total Environment**, v.463–464, p.1154–1162, 2013. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.04.016

BORTOLON, L. et al. A. Degree of phosphorus saturation threshold for minimizing P losses by runoff in cropland soils of Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1088–1098, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900008

BRASIL – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio - Brasil 2016/17 a 2026/2, Projeções de Longo Prazo**. Brasília, DF. 2017. 105p.

BRASIL – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa nº 25, de 23 de julho de 2009**. Normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 28 jul. Seção 1, p.20; 2009.

BRUULSEMA, T. W.; FIXEN, P.E.; SULEWSKI, G. D. **4C nutrição de plantas: um manual para melhorar o manejo da nutrição de plantas**. 1. ed. International Plant Nutrition Institute, 2013. 134p.

CAMARGO, F. A. O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Nitrogen fractions in the microbial biomass in soils of southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência**, v. 23, p.181-185, 1999. DOI: 10.1590/S0100-06831999000100022

CASSOL, P. C. et al. Disponibilidade de macronutrientes e rendimento de milho em Latossolo fertilizado com dejetos suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1911–1923, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000600025

CHEN, H. et al. Phosphorus addition affects soil nitrogen dynamics in a nitrogen-saturated and two nitrogen-limited forests. **European journal of Soil Science**, v.68, p. 472–479, 2017. DOI: 10.1111/ejss.12428

CUNHA, J. C. et al. Quantification of permanent and variable charges in reference soils of the state of Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1162–1169, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000400012

CORRÊA, J. C. et al. Organic, organomineral, and mineral fertilizers with urease and nitrification inhibitors for wheat and corn under no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.903–912, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X201600090000x

CORRÊA, J. C. et al. High yield corn fertilization with poultry litter based on nitrogen dosage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, n.2, 2018a.

CORREA, J. C. et al. Soil fertility and agriculture yield with the application of organomineral or mineral fertilizers in solid and fluid forms. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, n.3, 2018b.

DANGA, B. O. et al. Legume-wheat rotation effects on residual soil moisture, nitrogen and wheat yield in tropical regions. **Advances in Agronomy**, v.101, p.315–349, 2009. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)00805-5

DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Phosphorus Diffusion from Fertilizer: Visualization, Chemical Measurements, and Modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v.78, p.832–842, 2013. DOI: 10.2136/sssaj2013.07.0293

ELSER, J. J. et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. **Ecology Letters**, v.10, p.1135–1142, 2007. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2007.01113.x

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2^a. ed., Editora Planta, 2006. 401p.

ERNANI, P. R. et al. Downward movement of soil cations in highly weathered soils caused by addition of gypsum. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.37, p.571–586, 2006. DOI: 10.1080/00103620500449443

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Macronutrient-Use Efficiency and Changes in Chemical Properties of an Oxisol as Influenced by Phosphorus Fertilization and Tropical Cover Crops **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.35, p.1227-1246, 2014. DOI: 10.1080/00103624.2013.874030

FERNANDES, D. M. et al. Fósforo na solução do solo em resposta a aplicação de fertilizantes fluidos mineral e organomineral. **Irriga**, v.1, p.14–27, 2015. DOI: 10.15809/irriga.2015v1n1p14

GATIBONI, L. C. et al. Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos de suíno em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1753–1761, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000400040

GNAZDOWSKA, A.; RYCHTER, A. M. Low phosphate nutrition alters bean plants' ability to assimilate and translocate nitrate. **Journal of Plant Nutrition**, v.22, p.551–563, 1999. DOI: 10.1080/01904169909365651

GNIAZDOWSKA, A.; RYCHTER, A. M. Nitrate uptake by bean (*Phaseolus vulgaris* L.) roots under phosphate deficiency. **Plant Soil**, v.226, p.79–85, 2000.

GROHSKOPF, M. A. et al. Organic Nitrogen in a Typic Hapludox Fertilized with Pig Slurry. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.1, p.127–139, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20150080

GROHSKOPF, M. A. et al. Soil Solution Nutrient Availability, Nutritional Status and Yield of Corn Grown in a Typic Hapludox under Twelve Years of Pig Slurry Fertilizations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.40, e0150341, 2016. DOI: 10.1590/18069657rbc20150341

GROOT, C. et al. Interaction of nitrogen and phosphorus nutrition in determining growth. **Plant and Soil**, 248, 257–268, 2003.

GUOCHEN, K. P. et al. Greater root phosphatase activity in nitrogen-fixing rhizobial but not actinorhizal plants with declining phosphorus availability. **Journal of Ecology**, v.105, p.1246–1255, 2017. DOI: 10.1111/1365-2745.12758

HARPOLE, S. et al. Nutrient co-limitation of primary producer communities. **Ecology Letters**, v.14, p.852–862, 2011. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2011.01651.x

HEBERT, J. Nitrogen. In: BONNEAU, M., SOUCHER, B. **Constituents and properties of soil**. New York: Academic Press, p.435-442, 1982.

HEDIN, L. O. et al. The nitrogen paradox in tropical forest ecosystems. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v.40, p.613–635, 2009. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110246

HOULTON, B. Z. et al. A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere. **Nature**, v.454, p.327–330, 2008. DOI: 10.1038/nature07028

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Indicadores da Pecuária**. Brasília–DF. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria.html> >. Acesso em: 12 jul. 2017.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor agrossilvopastoril e agroindústrias associadas**. Brasília-DF. 2012. 129p. (Relatório de Pesquisa)

JACQUIN, F.; CHELOUFI, H.; VONG, P. C. Immobilization and mineralization kinetics of a nitrogen fertilizer in calcareous clayey soil (rendzina). **The Science Total Environment**, v.117, p.271–278, 1992.

JIANG, J. et al. Mobilization of phosphate in variable-charge soils amended with biochars derived from crop straws. **Soil & Tillage Research**, v.146, p.139–147, 2015. DOI: 10.1016/j.still.2014.10.009

KELLER, A. B. et al. Effects of canopy tree species on belowground biogeochemistry in a lowland wet tropical forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v.58, p.61–69, 2013. DOI: 10.1016/j.soilbio.2012.10.041

KELLEY, K. R.; STEVENSON, F. J. Forms and nature of organic N in soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.42, p.1–11, 1995.

LACERDA, J. J. J. et al. Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho em solo com fertilidade construída. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.9, p.769–778, 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015000900005

LARA-CABEZAS, W. A. R. et al. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto no triângulo mineiro (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.363–376, 2000. DOI: 10.1590/S0100-06832000000200014.

LUENGO, C. et al. Kinetics of phosphate adsorption on goethite: comparing batch adsorption and ATR-IR measurements. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.300, p.511–518, 2016. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.04.015

MAFRA, M. S. H. et al. Acúmulo de carbono em Latossolo adubado com dejetos líquido de suínos e cultivado em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, p.630–638, 2014. DOI:10.1590/S0100-204X2014000800007

MARIANO, E. et al. Soil nitrogen availability indices as predictors of sugarcane nitrogen requirements. **European Journal of Agronomy**, v.89, p.25–37, 2017. DOI: 10.1016/j.eja.2017.06.004

MARTINAZZO, R. et al. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.563–570, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000300016.

MCLAUGHLIN, M. J. et al. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils-implications for fertilizer management and design: An Australian perspective. **Plant Soil**, v.349, n.1, p.69–87, 2011. DOI:10.1007/s11104-011-0907-7

MÜLLER, C. et al. Effects of repeated fertilizer and slurry applications over 38 years on N dynamics in a temperate grassland soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v.43, p.1362–1371, 2011. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.03.014

MONTALVO, D.; DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Agronomic Effectiveness of Granular and Fluid Phosphorus Fertilizers in Andisols and Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v.79, n.2, p.577–584, 2015. DOI: 10.2136/sssaj2014.04.0178

MORAES, F. A.; GATIBONI, L. C. Phosphorus availability and microbial immobilization in a Nitisol with the application of mineral and organo-mineral fertilizers. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.87, n.4, p.2289–2299, 2015. DOI: 10.1590/0001-3765201520140008

NAKHONE, L. N.; TABATABAI, M. A. Nitrogen mineralization of leguminous crops in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.171, p.231–241, 2008. DOI: 10.1002/jpln200625162

NASTO, M. K. et al. Interactions among nitrogen fixation and soil phosphorus acquisition strategies in lowland tropical rain forests. **Ecology Letters**, v.17, p.1282–1289, 2014. DOI: 10.1111/ele.12335

NGUYEN, T. A.; SHINDO, H. Effects of different levels of compost application on amounts and distribution of organic nitrogen forms in soil particle size fractions subjected mainly to double cropping. **Agricultural Sciences**, v. 2, n.3, p.213–219, 2011. DOI: 10.4236/as.2011.23030

OLIVEIRA, L. B. et al. Formas de fósforo no solo sob pastagens naturais submetidas à adição de fosfatos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.3, p.867–878, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000300018

PAUNGFOO-LONHIENNE, C. et al. Past, present and future of organic nutrients. **Plant Soil**, v.359, p.1–18, 2012. DOI: 10.1007/s11104-012-1357-6

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and biochemistry**. 2.ed. California, Academic Press, 1996. 340p.

PAYET, N. et al. Modeling the fate of nitrogen following pig slurry application on a tropical cropped acid soil on the Island of Réunion (France). **Agriculture Ecosystems Environmental**, v.134, p.218–233, 2009. DOI: 10.1016/j.agee.2009.07.004

PELTRE, C. et al. Repeated application of organic waste affects soil organic matter composition: evidence from thermal analysis, FTIR-PAS, amino sugars and lignin biomarkers. **Soil Biology and Biochemistry**, v.104, p.117–127, 2017. DOI: 10.1016/j.soilbio.2016.10.016

REHM, G. W.; LAMB, J. Soybean response to fluid fertilizers placed near the seed at planting. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n.6, p.2223–2229, 2010. DOI:10.2136/sssaj2009.0442

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C. Phosphorus and potassium budget in the soil–plant system in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research**, v.126, p.127–133, 2013. DOI: 10.1016/j.still.2012.08.003

ROGERI, D. A. et al. Composition of Poultry Litter in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.40, e0140697, 2016. DOI: 10.1590/18069657rbcS20140697

RUFTY, T. W. et al. Phosphate regulation of nitrate assimilation in soybean. **Journal of Experimental Botany**, v.44, p.879–891, 1993. DOI: 10.1093/jxb/44.5.879

SANTOS, G. A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre-RS, 2008a. 636p.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C. KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, n.2, p.576–586, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000200049

SATTARI, S. Z. et al. Crop yield response to soil fertility and N, P, K inputs in different environments: Testing and improving the QUEFTS model. **Field Crops Research**, v.157, p.35–46, 2014. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.12.005

SCOLARI, D. D. G. **Produção agrícola mundial: o potencial do Brasil**. Revista FMC, Brasília, DF. 2006. 42p.

SETIYONO, T. et al. Estimating maize nutrient uptake requirements. **Field Crops Research**, v.118, p.158–168, 2010. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.05.006

- SHARMA, P. et al. Green manure as part of organic management cycle: Effects on changes in organic matter characteristics across the soil profile. **Geoderma**, v.305, p.197–207, 2017. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.06.003
- SHEN, J. et al. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v.156, p.997–1005, 2014. DOI: 10.1104/pp.111.175232
- SOUZA, M. F. et al. competitive sorption and desorption of phosphate and citrate in clayey and sandy loam soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1153–1161, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000400011
- SPARGO, J. T. et al. Organic Supplemental Nitrogen Sources for Field Corn Production after a Hairy Vetch Cover Crop. **Agronomy Journal**, v.108, p.1992–2002, 2016. DOI: 10.2134/agronj2015.0485
- STEVENSON, F. J. **Humus chemistry – genesis, composition, reactions**. 2ed. New York: Willey, 1994. 496p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed., Artmed, 2013. 918 p.
- TEJADA, M.; BENITEZ, C.; GONZALEZ, J. L. Effects of Application of Two Organomineral Fertilizers on Nutrient Leaching Losses and Wheat Crop. **Agronomy Journal**, v.97, p.960–967, 2005. DOI: 10.2134/agronj2004.0092
- ZHANG, K. et al. A dynamic model for the combined effects of N, P and K fertilizers on yield and mineral composition; description and experimental test. **Plant and Soil**, v.298, p.81–98, 2007. DOI: 10.1007/s11104-007-9342-1
- ZHANG, J. B. et al. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil nitrogen transformations. **European Journal of Soil Science**, v.63, p.75–85, 2011. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2011.01410.x

APÊNDICE A – ADUBAÇÃO FOSFATADA NO MILHO COM FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS EM NITOSSOLO VERMELHO COM ELEVADO TEOR DE FÓSFORO

RESUMO

Em solos de carga variável com elevado teor de fósforo (P) a adubação fosfatada com fertilizantes organominerais pode ter resposta diferenciada para a produtividade de milho. Desta forma, o objetivo do trabalho foi avaliar o teor nutricional e produtividade de três cultivos de milho sob sistema plantio direto em resposta à adubação fosfatada com fertilizante organomineral elaborado a base de cama de aves ou mineral. O experimento foi conduzido a campo sob Nitossolo Vermelho Distroférico com elevado teor inicial de P, sendo os tratamentos constituídos por dois tipos fertilizantes (organomineral ou mineral) em quatro doses de P (20, 40, 60 e 80 kg ha⁻¹ de P) para avaliação, além do controle (sem adubação fosfatada). Nos parâmetros do solo avaliados não houve diferença entre fertilizante organomineral e mineral, apenas relação direta entre as doses e os teores de carbono orgânico e P disponível no solo após três safras de milho, o que promoveu teor P no tecido vegetal dentro da faixa considerada adequada à cultura. No rendimento de milho o fertilizante organomineral foi superior em eficiência ao mineral e a recomendação de adubação para expectativa de produtividade de 9000 kg ha⁻¹ é de 80 kg ha⁻¹ de P em sistema plantio direto sob Nitossolo Vermelho Distroférico.

Palavras-chave: fertilização, resíduo orgânico, fertilizante mineral, eficiência

PHOSPHATE FERTILIZATION IN CORN WITH ORGANOMINERAL FERTILIZERS BASED IN A RHODIC KHANDIUDOX WITH HIGH PHOSPHORUS CONTENT

ABSTRACT

In soil of variable charge with high phosphorus (P) content the phosphate fertilization with organomineral fertilizers may have a difference response for corn yield. Thus, the aim of this research was to evaluate the nutritional content and corn

yield of three corn crops under no-tillage system in response to phosphate fertilization with organomineral prepared from poultry litter or mineral fertilizer. The experiment was carried out on field under Rhodic Khandiudox with high P content, being the treatments consisted of two fertilizers types (organomineral and mineral) in interaction with four doses of P (20, 40, 60 e 80 kg ha⁻¹ de P), and the control (unfertilized with P). In the soil parameters evaluated there are not differences between organomineral and mineral fertilizers, only direct relationship between the doses to organic carbon (OC) content and P available in the soil after three corn crops, which promoted P content in plant tissues within the level considered adequate for the culture. In the corn yield the organomineral fertilizer was superior to mineral in efficiency, and the fertilization recommendation for yield expectancy of 9000 kg ha⁻¹ is 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ under no-tillage system in a Rhodic Khandiudox.

Keywords: fertilization, organic waste, mineral fertilizer, efficiency

Introdução

Novos insumos para a correção e adubação de culturas são estratégicos para o agronegócio no Brasil em razão de aproximadamente 75% dos fertilizantes consumidos serem importados (ANDA, 2016), colocando o país numa situação de dependência destes insumos. Entre as estratégias para reverter este cenário vale destacar novos fertilizantes e as boas práticas de adubação de culturas (CORRÊA et al., 2016).

O fósforo (P) é o nutriente mais limitante da produtividade de biomassa em solos tropicais, onde menos de 0,1% encontra-se em solução (FINK et al., 2016), característica justificada em razão do material de origem ser de caráter oxidico, que por sua vez atribui alta capacidade de adsorção às superfícies de minerais (SHEN et al., 2011; JIANG et al., 2015), bem como pequena contribuição dos íons fosfato formarem complexos solúveis (SHUAI; ZINATI, 2009; BOLAN et al., 2013). Desta forma, nos solos oxidados as reações de adsorção e precipitação controlam o destino do P proveniente dos fertilizantes (MCLAUGHLIN et al., 2011; MONTALVO; DEFYSE; MCLAUGHLIN, 2015) o que corrobora a aplicação de P em doses elevadas e localizadas nestes tipos de solos.

Entretanto, em algumas regiões brasileiras como no oeste de Santa Catarina o uso intensivo do solo nas últimas décadas a as altas adubações originou uma condição de alta fertilidade nestes solos de caráter oxidico pelo histórico de uso agrícola, podendo estes solos apresentar padrões de respostas distintas aos fertilizantes. Com o potencial produtivo cada vez maior imposto pelo melhoramento genético das cultivares, há o desafio de aumentar a eficiência de uso dos fertilizantes, sendo necessário utilizar critérios de adubação capazes de atender necessidade nutricional imposta pela alta exportação dos nutrientes e manter a alta fertilidade do solo (LACERDA et al., 2015).

Entre as estratégias para elevar a eficiência de fertilizantes fosfatados tem sido estudado o uso de fontes alternativas orgânicas para dar suporte ou complementariedade ao mineral para formulação. Um dos benefícios dos fertilizantes organominerais em relação ao mineral está relacionado ao P, onde a presença de compostos orgânicos no fertilizante pode reduzir a fixação à fase mineral do solo (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008; FERNANDES et., 2015).

A cama de aves é o fertilizante orgânico mais utilizado em diversas regiões do Brasil (ROGERI et al., 2016). O reaproveitamento deste resíduo orgânico em fertilizantes tem objetivo de elevar a disponibilidade de nutrientes no sistema solo-planta, possibilitar o seu transporte a maiores distâncias como fórmulas comerciais pré-estabelecidas, permitindo, que saia de regiões de alta concentração da atividade avícola (MORAIS; GATIBONI, 2015, CORRÊA et al., 2016). Assim, o uso deste resíduo na elaboração de fertilizantes organominerais pode alterar a eficiência do P disponível nos solos de fertilidade construída de caráter oxidico em relação aos fertilizantes minerais solúveis, hipótese que a ser testada neste trabalho.

Desta forma, o objetivo do trabalho foi avaliar o teor nutricional e produtividade de três cultivos de milho em plantio direto em resposta à adubação fosfatada em Nitossolo Vermelho Distroférrico com elevado teor de P e adubado com fertilizante organomineral a base de cama de aves em comparação ao mineral solúvel.

Material e métodos

O experimento foi realizado em condição de campo no período entre 2012 e 2015 no município de Concórdia/SC, em área experimental localizada a 569 m de altitude, 27°14'2" de latitude sul e 52°1'40" de longitude oeste. O clima da região é

classificado como subtropical úmido (Cfa), segundo a classificação de Köppen. Os dados mensais referentes às temperaturas máxima e mínima com precipitação pluvial durante os anos de condução do experimento foram coletados na Estação Meteorológica à cerca de 300 m da área experimental (Figura A-1).

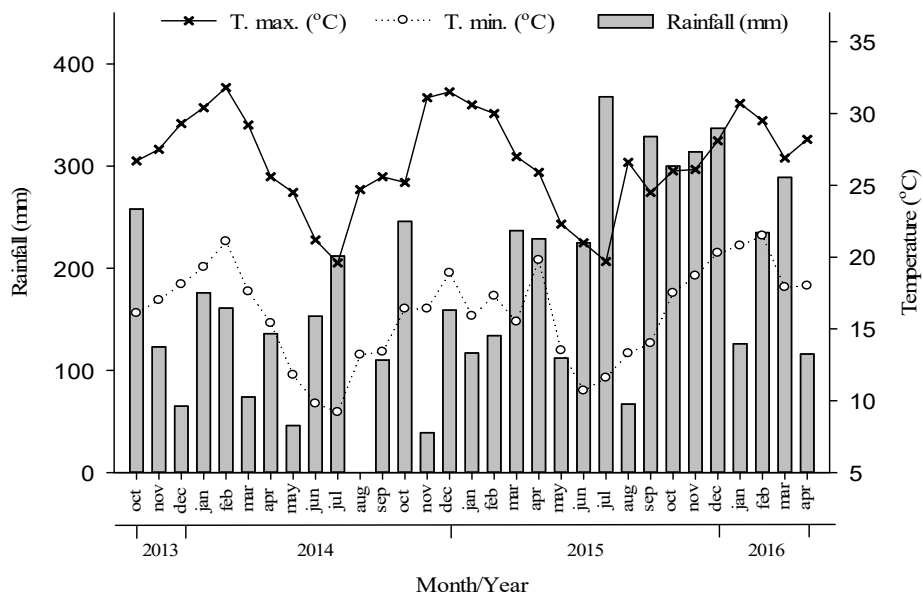


Figura A-1. Médias para temperaturas máximas e mínimas do ar e, soma para precipitação pluvial acumulada nos meses de condução do experimento. Concórdia, SC.

O solo do experimento é originado de basalto e classificado como Nitossolo Vermelho Distroférico (SANTOS et al., 2013) e apresentou as seguintes características químicas iniciais na implantação do experimento: pH em H₂O 5,0; 32,7 g dm⁻³ de MOS e 2,2 g dm⁻³ de N total; 60, 35, 15 e 40 mmol_c dm⁻³ para Ca, Mg, K e H+Al, respectivamente; 102 mg dm⁻³ de P disponível (Mehlich-1); 71% de Saturação por bases (V%); e densidade do solo de 1,2 g cm⁻³ na camada de 0,0-0,2 m. Anteriormente ao experimento, a área vinha sendo utilizada como pastagem com o uso de fertilizantes e corretivos por um longo período de tempo, o que promoveu a elevada fertilidade deste solo.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 2×4+1, com quatro repetições, sendo a unidade experimental constituída com dimensões de 5 x 6 m. Os tratamentos consistiram de dois fertilizantes (organomineral

e mineral) em interação com quatro doses de fósforo (20, 40, 60 e 80 kg ha⁻¹ de P) além do tratamento controle que não recebeu adubação fosfatada.

O fertilizante orgânico foi constituído de cama de aves de corte, retirada após seis lotes e apresentou respectivamente, 20, 40 e 22 g kg⁻¹ de N total, P₂O₅ e K₂O em sua composição. Para a formulação do OM foi considerado os teores de N, P e K presentes na cama de aves. Como fonte mineral para elaboração do organomineral na mistura foi utilizado o fosfato monoamônico (MAP) (NH₄H₂PO₄ com 48% de P₂O₅, 10% de N), na proporção a conduzir a formulação 05-20-02. Para a granulação do fertilizante organomineral a cama de aves foi micronizada (moída e peneirada na granulometria de 1,0 mm).

A mistura dos materiais (orgânico e mineral) foi feita de forma homogênea previamente com as quantidades de cada material para compor cada formulação em teste, sendo posteriormente colocado granulador de disco usando 1% de bentonita como adjuvante para dureza ao material e 0,5% de silicato de cálcio neutro como aglomerante para a granulação do fertilizante. Após o processo de granulação, o fertilizante organomineral foi peneirado entre malhas de 1 e 4 mm, sendo separado o material retido entre as duas peneiras, o qual foi seco em estufa de circulação forçada de ar à 65°C por 48 h.

O fertilizante mineral foi composto a partir do mesmo fosfato monoamônico para atender a quantidade fixada em cada tratamento. Durante o ciclo de cada cultura foram aportados 80 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio durante a semeadura e 140 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia em adubação de cobertura. Os fertilizantes aportados na semeadura foram depositados no solo em sulco de linha afastados em 0,04 m da linha de semeadura.

A cultivar de milho utilizado para semeadura foi o híbrido simples Syngenta superprecoce nas safras 2012/13, 2013/14 e 2014/15, respectivamente, semeados no espaçamento de 0,80 m entre linhas e 5,8 sementes por metro, para um estande de 60000 plantas ha⁻¹. No período de inverno sempre na segunda quinzena de abril foi realizado, com o intuito apenas de cobertura e sem adubação, a semeadura de aveia branca com densidade de 50 kg ha⁻¹ de sementes, aproximadamente 80 sementes por metro linear em espaçamento entre linhas de 0,20 m nos anos de 2013 e 2014, respectivamente. Antes da semeadura das culturas foi realizado a dessecação das plantas 14 dias antes, utilizando o princípio ativo glyphosate na dose de 1.800 g ha⁻¹ de i.a.

Nos anos agrícolas de 2012/13, 2013/14 e 2014/15 na cultura do milho foi realizada a colheita manual de duas fileiras com 2 m de comprimento e 0,8 m de largura entre fileiras totalizando 3,2 m². Após, foi realizada a trilha manual, pesagem do grão úmido e posterior secagem separando-se a palha e os grãos e, em seguida, determinado o peso dos grãos colhidos para o cálculo da produtividade (grãos por hectare), corrigindo a umidade para o valor de 13%.

A avaliação da eficiência agronômica do fertilizante organomineral nas doses avaliadas de P foi feita pelo índice de eficiência agronômica (IEA), estimado com base na proporção entre o incremento promovido pelo fertilizante organomineral na produtividade de grãos da cultura do milho em relação ao incremento promovido pelo fertilizante mineral na mesma dose.

Para a determinação do teor de P no tecido foram coletadas 30 folhas do terço central oposta e abaixo da espiga, na fase de pendoamento do milho (50% de plantas pendoadas) conforme descrito por Tedesco et al. (2004). As amostras de tecido vegetal coletadas foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C até atingir peso constante. Posteriormente, o material foi moído para a determinação dos teores P conforme descrito por Tedesco et al. (1995).

A amostragem estratificada do solo foi referente ao final do ciclo da cultura de milho em 2015 no terceiro ano de experimento, nas camadas de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m de profundidade. Sendo retiradas aleatoriamente três amostras simples, duas na entrelinha e uma na linha, para constituir a amostra composta. As amostras compostas foram secas ao ar e peneiradas (malha 2 mm), sendo posteriormente submetidas à análise de carbono orgânico (CO) por analisador elementar CHNS/O e o P disponível determinado conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

Os dados foram submetidos à análise da homogeneidade da variância e da normalidade. Após, atendidas as exigências paramétricas da estatística, as médias de tratamentos que foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro, protegido pela significância do teste F global. Adicionalmente, foi realizada análise de regressão para determinar o comportamento das variáveis em resposta da aplicação das doses do fertilizante organomineral e mineral.

Resultados e discussão

Houve resposta para efeito de dose com incremento crescente no teor de carbono orgânico (CO) até a profundidade de 0,2 m independente da forma de fertilizante, e entre fertilizantes não houve diferença entre o organomineral ou mineral em ambas as camadas avaliadas (Tabela A-1).

Tabela A-1. Teor de carbono orgânico (CO) (g kg^{-1}) em Nitossolo Vermelho Distroférico após três cultivos de milho em resposta a aplicação de fertilizante organomineral ou mineral em doses crescentes de P no solo.

Fertilizante	Dose de P (kg ha^{-1})					Equação de regressão
	0	20	40	60	80	
	Camada de 0,0-0,1 m					
Organomineral	27,2	28,8	29,4	31,8	27,6	$\hat{y} = 27,4 - 0,04x + 0,005x^2 - 0,00006x^3$ $R^2 = 0,76$
Mineral	27,2	28,4	29,6	32,9	26,4	$\hat{y} = 27,4 - 0,2x + 0,01x^2 - 0,0001x^3$ $R^2 = 0,79$
Media	27,2 b	28,6	29,5	32,4	27,1	$\hat{y} = 27,4 - 0,1x + 0,008x^2 - 0,00008x^3$ $R^2 = 0,78$
	Camada de 0,1-0,2 m					
Organomineral	17,4	18,4	20,0	18,9	18,5	$\hat{y} = 17,3 + 0,1x - 0,001x^2$ $R^2 = 0,70$
Mineral	17,4	19,0	19,1	19,6	18,1	$\hat{y} = 17,4 + 0,09x - 0,001x^2$ $R^2 = 0,81$
Media	17,4	18,7	19,6	19,2	18,3	$\hat{y} = 17,4 + 0,09x - 0,001x^2$ $R^2 = 0,89$
	⁽¹⁾ Camada de 0,0-0,2 m					
Organomineral	22,3	23,6	24,8	25,3	23,0	$\hat{y} = 22,0 + 0,1x - 0,001x^2$ $R^2 = 0,78$
Mineral	22,3	23,8	24,3	26,3	22,3	$\hat{y} = 21,9 + 0,1x - 0,002x^2$ $R^2 = 0,58$
Media	22,3	23,7	24,6	25,8	22,6	$\hat{y} = 22,0 + 0,1x - 0,002x^2$ $R^2 = 0,67$

Médias ligadas por letras distintas (na vertical) representam a diferença entre fertilizantes na mesma dose pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). ⁽¹⁾ Valor de CO estimado com base nas camadas de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m.

O efeito de dose na camada de 0,0-0,1 m apresentou comportamento cúbico crescente com ponto crítico nas doses de 28 e 50 kg ha^{-1} para fertilizantes organomineral e mineral (Tabela A-1). Na camada de 0,1-0,2 m e 0,0-0,2 m houve comportamento quadrático crescente, com ponto de máxima nas doses de 50 e 45 kg ha^{-1} na camada de 0,0-0,1 m e 50 e 40 kg ha^{-1} na camada de 0,0-0,2 m para organomineral e mineral.

O Nitossolo Vermelho Distroférico permite grande capacidade de estocar carbono em razão do alto teor de argila, o que confere maior superfície específica e melhor agregação (LOSS et al., 2011). No sistema de manejo plantio direto pelo não revolvimento do solo, a aplicação de fertilizantes orgânicos, organominerais e minerais permite à retenção de nutrientes e matéria orgânica no sistema na camada superficial do solo (TEWOLDE et al., 2008, WATTS et al., 2010, MAFRA et al., 2014).

Após três safras de milho não houve diferença entre fertilizantes para a mesma dose e houve efeito de doses para cada fertilizante com comportamento crescente para teor de P disponível no solo (Tabela A-2). Embora os teores de P no solo estejam com limites de interpretação muito alto (TEDESCO et al., 2004), a sua disponibilidade

nos solos de caráter oxidico é fortemente controlada devida a sua intensa adsorção a fase mineral e alta quantidade de sítios adsorventes (SHUAI; ZINATI, 2009; BORTOLON et al., 2016; FINK et al., 2016), permitindo mesmo nestas condições de alto teor de P no solo controlar o destino do P proveniente dos fertilizantes.

Tabela A-2. Teor de fósforo (P) (mg kg⁻¹) disponível Nitossolo Vermelho Distroférico após três cultivos de milho em resposta a aplicação de fertilizante organomineral e mineral em doses crescentes de P no solo.

Fertilizante	Dose de P (kg ha ⁻¹)					Equação de regressão
	0	20	40	60	80	
	Camada de 0,0-0,1 m					
Organomineral	106,7	114,2	119,2	123,2	119,8	$\hat{y} = 106,3 + 0,5x - 0,004x^2$ R ² = 0,87
Mineral	106,7	115,8	118,3	120,0	120,5	$\hat{y} = 107,3 + 0,4x - 0,003x^2$ R ² = 0,88
Media	106,7	115,0	118,8	121,6	120,2	$\hat{y} = 106,8 + 0,5x - 0,004x^2$ R ² = 0,90
	Camada de 0,1-0,2 m					
Organomineral	98,3	109,2	108,2	100,0	100,1	$\hat{y} = 98,2 + 1,1x - 0,03x^2 - 0,0002x^3$ R ² = 0,88
Mineral	98,3	101,7	100,8	99,2	103,7	$\hat{y} = 98,2 + 0,4x - 0,01x^2 - 0,0001x^3$ R ² = 0,89
Media	98,3	105,4	104,5	99,6	101,9	$\hat{y} = 98,2 + 0,8x - 0,02x^2 - 0,0002x^3$ R ² = 0,88
	⁽¹⁾ Camada de 0,0-0,2 m					
Organomineral	102,5	111,7	113,7	111,6	110,0	$\hat{y} = 102,5 + 0,7x - 0,01x^2 - 0,00008x^3$ R ² = 0,90
Mineral	102,5	108,8	109,6	109,6	112,1	$\hat{y} = 102,5 + 0,5x - 0,01x^2 - 0,00008x^3$ R ² = 0,90
Media	102,5	110,2	111,6	110,5	111,1	$\hat{y} = 102,5 + 0,6x - 0,01x^2 - 0,00008x^3$ R ² = 0,92

Médias ligadas por letras distintas (na vertical) representam a diferença entre fertilizantes na mesma dose pelo teste Tukey (p≤0,05). ⁽¹⁾ Valor de P disponível estimado com base nas camadas de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m.

Mesmo o solo apresentando altos teores de P em ambas as camadas, os maiores teores na camada mais superficial de 0,0-0,1 m em relação a de 0,1-0,2 m é devido a ser um elemento pouco móvel no perfil de solos de caráter oxidico. Somado a isto, o sistema de plantio direto por não apresentar revolvimento total do solo, também favorece o acúmulo de nutrientes na camada mais superficial (FINK et al., 2016).

O efeito de dose nas camadas de solo avaliadas para cada fertilizante, houve comportamento quadrático crescente na camada de 0,0-0,1 m e cúbico crescente nas camadas de 0,1-0,2 e 0,0-0,2 m para ambos os fertilizantes (mineral e organomineral) (Tabela A-2). Na camada de 0,0-0,1 m o máximo incremento de P disponível foram nas doses de 62 e 63 kg ha⁻¹ de P para os fertilizantes organomineral e mineral; nas camadas de 0,1-0,2 m os pontos críticos foram nas doses de 50 e 34 kg ha⁻¹ e, na camada de 0,0-0,2 m de 41 e 42 kg ha⁻¹ para os fertilizantes organomineral e mineral, respectivamente.

Não houve diferença entre a aplicação de fertilizante organomineral e mineral nos teores de P no tecido da folha diagnose de milho em resposta a aplicação de

doses crescentes de P no solo (Tabela A-3). Os valores de P no tecido variaram de 2,6 a 3,3 g kg⁻¹, os quais se situam dentro da faixa considerada adequada para a cultura do milho de 2-4 g kg⁻¹ conforme descrito por Tedesco et al. (2004). A razão do teor adequado de P mesmo no tratamento controle está relacionado ao solo já apresentar teor alto, desde o início do experimento (102 mg kg⁻¹) e permite alcançar produtividades adequadas mesmo sem adubação do sistema plantio direto.

Tabela A-3. Teor de fósforo (P) no tecido de folhas⁽¹⁾ de milho das três safras realizadas durante a condução do experimento em resposta a aplicação de fertilizante organomineral e mineral em doses crescentes de P em Nitossolo Vermelho Distroférico.

Fertilizante	Dose de P (kg ha ⁻¹)					Equação de regressão
	0	20	40	60	80	
	Safrá 2013/14					
Organomineral	2,8	3,0	2,8	2,8	2,8	$\hat{y} = 2,8$
Mineral	2,8	3,0	2,7	3,2	2,9	$\hat{y} = 2,9$
Media	2,8	3,0	2,8	3,0	2,8	$\hat{y} = 2,9$
	Safrá 2014/15					
Organomineral	2,6	2,8	2,7	3,0	3,0	$\hat{y} = 2,8$
Mineral	2,6	2,7	2,9	3,4	3,1	$\hat{y} = 2,9$
Media	2,6	2,8	2,8	3,2	3,0	$\hat{y} = 2,9$
	Safrá 2015/16					
Organomineral	2,6	2,6	2,8	3,2	3,2	$\hat{y} = 2,9$
Mineral	2,6	2,5	2,7	3,3	3,0	$\hat{y} = 2,8$
Media	2,6	2,6	2,8	3,2	3,1	$\hat{y} = 2,9$
	Média					
Organomineral	2,7	2,8	2,8	3,0	3,0	$\hat{y} = 2,9$
Mineral	2,7	2,7	2,8	3,3	3,0	$\hat{y} = 2,9$
Media	2,7	2,8	2,8	3,2	3,0	$\hat{y} = 2,9$

Médias ligadas por letras distintas (minúsculas na horizontal e maiúscula na vertical) diferem ($p \leq 0,05$) pelo teste Tukey. ⁽¹⁾ Folha diagnose do milho conforme descrito por Tedesco et al. (2004).

A produtividade de grãos de milho foi maior com a aplicação de fertilizante organomineral como fonte à cultura do milho (Figura A-2). Nas safras 2012/13, 2014/15 e na soma das produtividades o fertilizante organomineral foi superior na produtividade em todas as doses de aplicação de P testadas (20, 40, 60 e 80 kg ha⁻¹). Já, na safra de 2013/14 houve apenas diferenças entre fertilizantes nas doses de 60 e 80 kg ha⁻¹ com o fertilizante organomineral superior ao mineral.

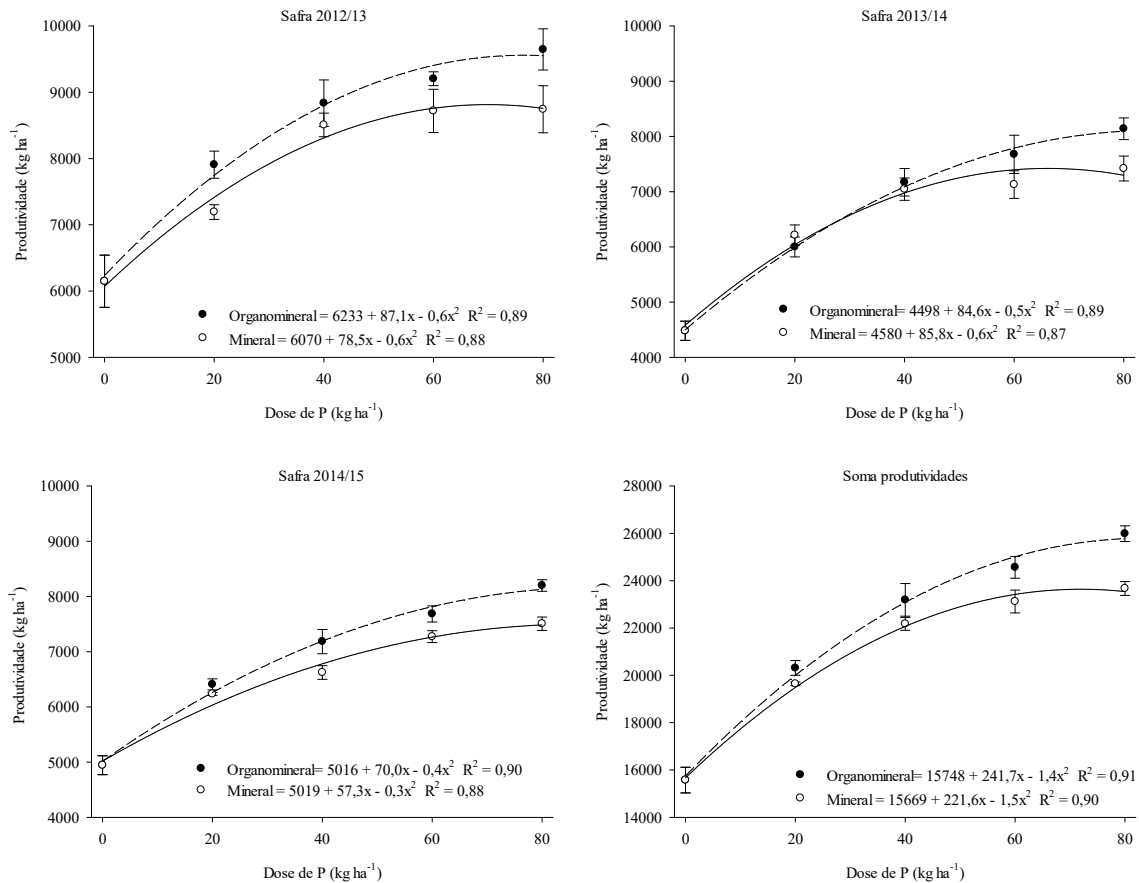


Figura A-2. Produtividade de grãos de milho nos três anos de condução do experimento em resposta as recomendações crescentes de fósforo em sistema de plantio direto. Média de quatro repetições. Barras verticais em cada ponto representam o erro padrão dos valores.

A superioridade do fertilizante organomineral em relação ao mineral pode ser devido a presença da matéria orgânica (MO) proveniente da cama de aves utilizada na elaboração do fertilizante. O aporte de MO presente no fertilizante organomineral permite liberação mais lenta do P no solo, permitindo maior adequação da planta para aproveitamento ao longo do ciclo (CORREA et al., 2016).

E, após dissolução é eminente sua ligação às formas cristalinas nos óxidos de Fe e Al o que torna sua disponibilidade localizada ao sulco de plantio, e a pequena presença do carbono do fertilizante, torna mínima a competição entre ânions orgânicos e P pelos sítios de adsorção no solo, efeito já reconhecido na literatura (FERNANDES et al., 2015; SHUAI; ZINATI, 2009).

Nas três safras de milho houve comportamento quadrático crescente para a produtividade de grãos de milho em resposta a aplicação de doses crescentes de P

no solo na forma de fertilizante organomineral e mineral (Figura A-2). As doses de máxima resposta para a produtividade de grãos de milho são: 73 e 65 kg ha⁻¹ na safra 2012/13, 80 e 72 kg ha⁻¹ na safra 2013/14, 80 e 80 kg ha⁻¹ na safra 2014/15 e 80 e 74 kg ha⁻¹ para a soma das produtividades, nos fertilizantes organomineral e mineral, respectivamente.

Mesmo sem recomendação de adubação (dose zero) houve produtividade de grãos de milho satisfatória nas safras de 2012/13, 2013/14, 2014/15 (Figura A-2). Vale ressaltar que o solo no início do experimento já apresentava a fertilidade construída com alto teor inicial de P disponível, sendo que anteriormente a área vinha sendo utilizada como pastagem melhorada com o uso de fertilizantes e corretivos por mais de dez anos.

Adotando-se 90% da produtividade máxima de grãos de milho em cada safra agrícola, as doses de P são de: 42 e 34 kg ha⁻¹ na safra 2012/13, 44 e 38 kg ha⁻¹ na safra 2013/14, 43 e 42 kg ha⁻¹ na safra 2014/15 e 42 e 31 kg ha⁻¹ para a soma das produtividades, nos fertilizantes organomineral e mineral, respectivamente.

Pesquisas com fertilizantes organominerais na forma sólida demonstram semelhança ou até aumento na produtividade das culturas em comparação as fontes minerais (BABALOLA et al., 2007; CORREA et al., 2016). Entretanto, em relação ao uso de fertilizantes organominerais como fonte de adubação às culturas, são escassos os trabalhos de pesquisa, o que exige investigação científica em condições experimentais para a sua otimização na adubação.

A partir dos dados de eficiência relativa para produtividade pode-se afirmar que o fertilizante organomineral obteve valores superiores a 100% o que confere maior eficiência ao mineral, com exceção na dose 20 kg ha⁻¹ no ano de 2013/14 em que o fertilizante mineral foi superior ao organomineral (Tabela A-4). A eficiência relativa da soma de produtividade dos três anos agrícolas permite inferir sobre eficiência próxima a 20% do fertilizante organomineral quando comparada a mesma dose do mineral, em condições de anos com déficit hídrico e sob Nitossolo Vermelho Distroférico.

Tabela A-4. Índice de eficiência agrônômica (IEA) das produtividades de milho do fertilizante organomineral a base de cama de aves em relação ao fertilizante mineral na forma de superfosfato triplo. Média de quatro repetições.

Produtividade milho	Dose de P (kg ha ⁻¹)				média
	20	40	60	80	
	----- % -----				
2012/13	168 ± 22	113 ± 18	119 ± 12	135 ± 28	134 ± 21
2013/14	88 ± 11	105 ± 14	121 ± 17	124 ± 10	109 ± 13
2014/15	113 ± 12	133 ± 16	118 ± 9	127 ± 6	123 ± 11
Soma*	117 ± 10	115 ± 11	119 ± 14	129 ± 7	120 ± 10

*IEA estimado com base na soma das produtividades obtidas nas três safras de milho.

Conclusões

Nos parâmetros do solo avaliados não houve diferença entre fertilizante organomineral e mineral, apenas relação direta entre as doses e os teores de carbono orgânico e P disponível no solo após três safras de milho, o que promoveu teor P no tecido vegetal dentro da faixa considerada adequada à cultura.

No rendimento de milho o fertilizante organomineral foi superior em eficiência ao mineral e a recomendação de adubação para expectativa de produtividade de 9000 kg ha⁻¹ é de 80 kg ha⁻¹ de P em sistema plantio direto sob Nitossolo Vermelho Distroférico.

Referências

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Setor de Fertilizantes: Anuário Estatístico 2016**. São Paulo–SP. 2016. Disponível em: <
<http://anda.org.br/pdfs/INDICE-ANUARIO-2016.pdf> >. Acesso em: 12 jul. 2017.

BABALOLA, O. et al. Effects of vetiver grass (*Vetiveria nigriflora*) strips, vetiver grass mulch and an organomineral fertilizer on soil, water and nutrient losses and maize (*Zea mays* L.) yields. **Soil Tillage Research**, v.96, p.6-18, 2007. DOI:
 10.1016/j.still.2007.02.008

BORTOLON, L. et al. A. Degree of phosphorus saturation threshold for minimizing P losses by runoff in cropland soils of Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1088–1098, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900008

BOLAN, N. et al. Phosphorus–arsenic interactions in variable-charge soils in relation to arsenic mobility and bioavailability. **Science of the Total Environment**, v.463–464, p.1154–1162, 2013. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.04.016

CORRÊA, J. C. et al. Organic, organomineral, and mineral fertilizers with urease and nitrification inhibitors for wheat and corn under no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.903–912, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X201600090000x

FERNANDES, D. M. et al. Fósforo na solução do solo em resposta a aplicação de fertilizantes fluidos mineral e organomineral. **Irriga**, v.1, p.14–27, 2015. DOI: 10.15809/irriga.2015v1n1p14

FINK, J. R. et al. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, n.1, p.62–68, 2016. DOI: 10.1016/j.still.2015.07.017

JIANG, J. et al. Mobilization of phosphate in variable-charge soils amended with biochars derived from crop straws. **Soil & Tillage Research**, v.146, p.139–147, 2015. DOI: 10.1016/j.still.2014.10.009

LACERDA, J. J. J. et al. Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho em solo com fertilidade construída. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.9, p.769–778, 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015000900005

LOSS, A. et al. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1269-1276, 2011. DOI: 10.1590/S0100-204X2011001000022.

MAFRA, M. S. H. et al. Acúmulo de carbono em Latossolo adubado com dejetos líquido de suínos e cultivado em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, p.630–638, 2014. DOI:10.1590/S0100-204X2014000800007

MCLAUGHLIN, M. J. et al. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils-implications for fertilizer management and design: An Australian perspective. **Plant Soil**, v.349, n.1, p.69–87, 2011. DOI:10.1007/s11104-011-0907-7

MONTALVO, D.; DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Agronomic Effectiveness of Granular and Fluid Phosphorus Fertilizers in Andisols and Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v.79, n.2, p.577–584, 2015. DOI:10.2136/sssaj2014.04.0178

MORAES, F. A.; GATIBONI, L. C. Phosphorus availability and microbial immobilization in a Nitisol with the application of mineral and organo-mineral fertilizers. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.87, n.4, p.2289–2299, 2015. DOI: 10.1590/0001-3765201520140008

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C. KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, n.2, p.576–586, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000200049

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. 3 ed. Embrapa: Brasília, DF, 2013.353p.

SHEN, J. et al. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v.156, p.997–1005, 2014. DOI: 10.1104/pp.111.175232

SHUAI, X.; ZINATI, G. Proton charge and adsorption of humic acid and phosphate on goethite. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n.6, p.2013-2020, 2009. DOI:10.2136/sssaj2009.0119

TEDESCO, M., J. et al. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 212 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TEDESCO, M. J. et al. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

TEWOLDE, H. et al. No-till and convention-till cotton response to broiler litter fertilization in an upland soil: Lint yield. **Agronomy Journal**, v.100, n.3, p.502–509, 2008. DOI:10.2134/agronj2007.0137

ROGERI, D. A. et al. Composition of Poultry Litter in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.40, e0140697, 2016. DOI: 10.1590/18069657rbc20140697

WATTS, D. B. et al. Long-term tillage and poultry litter impacts soil carbon and nitrogen mineralization and fertility. **Soil Science Society of America Journal**, v.74, n.4, p.1239-1247, 2010. DOI:10.2136/sssaj2008.0415