



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
DOUTORADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

MARIA REGILENE DE FREITAS COSTA PAIVA

**FRACIONAMENTO E EFEITO DO TEMPO DE CONTATO DO FÓSFORO
INORGÂNICO EM SOLOS DO SEMIÁRIDO**

MOSSORÓ-RN

2019

MARIA REGILENE DE FREITAS COSTA PAIVA

**FRACIONAMENTO E EFEITO DO TEMPO DE CONTATO DO FÓSFORO
INORGÂNICO EM SOLOS DO SEMIÁRIDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Fertilidade do Solo e Adubação.

Orientador: Prof. Fábio Henrique Tavares de Oliveira.

MOSSORÓ-RN

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

P142f Paiva, Maria Regilene de Freitas Costa.
Fracionamento e efeito do tempo de contato do
fósforo inorgânico em solos do semiárido / Maria
Regilene de Freitas Costa Paiva. - 2019.
59 f.: il.

Orientador: Fábio Henrique Tavares de Oliveira.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2019.

1. disponibilidade de fósforo. 2. Fator
capacidade de fósforo. 3. solos calcários. I.
Oliveira, Fábio Henrique Tavares de, orient. II.
Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MARIA REGILENE DE FREITAS COSTA PAIVA

**FRACIONAMENTO E EFEITO DO TEMPO DE CONTATO DO FÓSFORO
INORGÂNICO EM SOLOS DO SEMIÁRIDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água da Universidade Federal
Rural do Semi-Árido, como requisito para obtenção
do título de Doutor em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Fertilidade do Solo e Adubação.

Defendida em: 12 / 07 / 2019

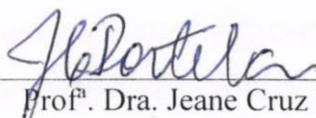
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Fábio Henrique Tavares de Oliveira (UFERSA)
Presidente



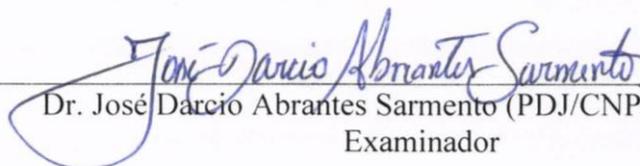
Prof.ª Dra. Welka Preston Leite Batista da Costa Alves (UERN)
Examinadora



Prof.ª Dra. Jeane Cruz Portela (UFERSA)
Examinadora



Prof. Dr. Leilson Costa Grangeiro (UFERSA)
Examinador



Dr. José Darcio Abrantes Sarmiento (PDJ/CNPq/UFERSA)
Examinador

A meu pai, Manoel Raimundo da Costa (in memória) e a minha mãe Joana Luíza de Freitas, obrigada pelos ensinamentos de vida e pelo imenso amor a mim dedicado.

OFEREÇO

A Deus, pelo seu infinito amor, bondade, e o seu cuidado constante em minha vida.

Aos meus familiares, pelo apoio e compreensão.

A meu amado esposo Onésimo Paiva, por sua presença constante em minha vida, apoiando-me em todos os momentos, pelo carinho e amor.

A meu filho Enzo Freitas Paiva, pela felicidade de tê-lo em minha vida e pelas alegrias que me proporciona diariamente.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela graça concedida, pelo amor, cuidado, e por realizar mais uma conquista em minha vida.

A meu esposo Onésimo Paiva pelo auxílio nos momentos que necessitei, pela paciência e compreensão nos dias de estudo, pelo amor e carinho, e por estar sempre ao meu lado.

A meu filho Enzo Freitas Paiva por ser minha maior benção aqui na terra.

A minha mãe Joana Luíza de Freitas pelo seu amor incondicional e cuidado em todos os momentos da minha vida.

A meus irmãos e sobrinhos pelo apoio, amor, dedicação, confiança e por se orgulharem de mim.

A Universidade federal Rural do Semi-árido (UFERSA) pelo crescimento profissional proporcionado e pela realização deste sonho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, pela oportunidade e a todos os professores por todo o aprendizado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa durante o curso de doutorado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Henrique Tavares de Oliveira, muito obrigada por tudo, pela valiosa orientação profissional, amizade, apoio, confiança e incentivo.

À banca examinadora, Prof^a. Dra. Welka Preston Leite Batista da Costa Alves, Prof^a. Dra. Jeane Cruz Portela, Prof. Dr. Leilson Costa Grangeiro, e Dr. José Darcio Abrantes Sarmiento, pelas valiosas contribuições para esta pesquisa.

Aos amigos do grupo de Química e Fertilidade do Solo, Montesquieu Vieira, Welka Preston, Jandeilson Arruda, Hernane Arllen, Helena Maria, Marina Beatriz, Arthur Allan, Anderson Moura, Milene Farias e Marx Cunha, pelo companheirismo, esforço e dedicação durante e após a realização das análises.

Aos funcionários do Laboratório de solo água e planta (LASAP), os laboratoristas, Elídio Barbosa, Kaline Ferreira, Paula Neitzke, Antônio Silva, Tomás Silva e David Jataí pelo apoio imprescindível.

Aos demais, que, de alguma forma contribuíram para a execução deste trabalho.

Muito obrigada!

Aquele que leva a preciosa semente, andando e chorando, voltará sem dúvida com alegria, trazendo consigo os seus molhos (Salmo 126.6).

RESUMO GERAL

O estudo do fósforo inorgânico (Pi) do solo é importante para avaliar o fósforo (P) disponível e as formas com que o mesmo está preferencialmente sorvido no solo, assim como sua disponibilidade após longo período de contato, sendo tais informações importantes para o planejamento da adubação fosfatada e para a avaliação do efeito residual da mesma. No primeiro experimento objetivou-se quantificar os teores das frações de fósforo inorgânico em nove solos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Piranhas-Açu (RN) e Jaguaribe (CE) e correlacioná-los com as medidas do fator capacidade de fósforo desses solos. Foram coletadas amostras na camada de 0-30 cm em nove solos dessa região, posteriormente, foram pesadas amostras correspondentes a um volume de 2dm³ em saco plástico preto, as quais receberam duas doses de P de acordo com fósforo remanescente (zero e 65; zero e 90; zero e 115 mg dm⁻³) aplicadas e homogeneizadas em 100% do volume de solo de cada saco plástico, posteriormente, seguiu-se um período de incubação por trinta dias, adicionando-se água deionizada em quantidade correspondente a 50% da porosidade total de cada solo. Após o período de incubação, foi realizado o fracionamento do Pi. A análise estatística consistiu das análises de correlação entre os teores das frações de Pi com as medidas do fator capacidade de fósforo desses solos. A capacidade máxima de sorção de fosfato (CMSP) apresentou correlação elevada com os valores de fósforo remanescente (P-rem), indicando que o P-rem pode ser usado como medida para se estimar o fator capacidade de fósforo (FCP) desses solos. O coeficiente de correlação entre os valores de CMSP e os teores de argila também foi elevado, mostrando que nesses solos o teor de argila é tão eficiente quanto o P-rem para estimar o FCP desses solos. A adubação fosfatada não causou a formação do fósforo com o Ca²⁺ nos três solos ácidos e com teores mais baixos de Ca²⁺. Também não aumentou os teores do fósforo na solução dos solos, entretanto aumentou os teores de todas as demais frações de Pi. No segundo experimento objetivou-se avaliar o efeito do tempo de contato de doses de P aplicadas em quatro solos alcalinos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Piranhas-Açu (RN) e Jaguaribe (CE) e analisar a disponibilidade desse nutriente para as plantas de milho. Foram coletadas amostras na camada de 0-30 cm em quatro solos dessa região, posteriormente, foram pesadas amostras correspondentes a um volume de 3,3 dm³ em saco plástico preto, as quais receberam as doses de P (0, 100, 200 e 300 mg dm⁻³) na forma de KH₂PO₄ e foram incubadas por diferentes períodos (0, 15, 30, 60, 160, 260 e 360 dias), adicionando-se um volume de água deionizada correspondente a 50% da porosidade total de cada solo. Após o período de incubação o milho foi semeado e o experimento foi realizado em delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial (4 solos × 7 tempos de incubação × 4 doses) e três repetições, totalizando 336 unidades experimentais. Trinta dias após a semeadura foi realizado o corte das plantas para as análises. Foram realizadas análise de variância e regressão para avaliar o efeito de doses de P e do tempo de incubação no teor de P recuperado pelo extrator no solo, no conteúdo de P na planta e matéria seca. Em todos os solos estudados os teores de P no solo aumentaram com o aumento das doses de P. Com o aumento do tempo de contato, os teores de fósforo na planta diminuíram nos primeiros 30 a 60 dias após a incubação, continuaram diminuindo até 120 dias, mas depois tenderam a se estabilizarem nos maiores tempos de contato do fósforo com os solos. Os quatro solos estudados, embora apresentem variações de fator capacidade de fósforo (FCP), não apresentaram muitas diferenças entre si quanto às produções de matéria seca estimada mínima e máxima da parte aérea das plantas de milho.

Palavras chaves: disponibilidade de fósforo, fator capacidade de fósforo, solos calcários.

GENERAL SUMMARY

The study of soil inorganic phosphorus (Pi) is important to evaluate the available phosphorus (P) and the ways in which it is preferentially sorbed in the soil, as well as its availability after a long contact period, being this information important to plan phosphate fertilization and its residual effect evaluation. The first experiment aimed to quantify the levels of inorganic phosphorus fractions in nine soils of the semiarid region located between the Piranhas-Açu (RN) and Jaguaribe (CE) river valleys and to correlate them with the phosphorus capacity factor of these soils. Samples were collected in the 0-30 cm layer in nine soils of this region, subsequently samples corresponding to a volume of 2 dm³ were weighed in a black plastic bag, which received two doses of P according to the remaining phosphorus (zero and 65; zero and 90, zero and 115 mg dm⁻³) applied and homogenized in 100% of the soil volume of each plastic bag, followed by an incubation period for thirty days, adding deionized water in a quantity corresponding to 50% total porosity of each soil. After the incubation period, Pi was fractionated. Statistical analysis consisted of correlation analyzes between the levels of Pi fractions and the phosphorus capacity factor measurements of these soils. The maximum phosphate sorption capacity (PBMC) was highly correlated with the remaining phosphorus values (P-rem), indicating that P-rem can be used as a measure to estimate the phosphorus capacity factor (FCP) of these soils. The correlation coefficient between PBMC values and clay contents was also high, showing that in these soils the clay content is as efficient as P-rem to estimate the CPF of these soils. Phosphate fertilization did not cause phosphorus formation with Ca²⁺ in the three acid soils with lower Ca²⁺ contents. It did not increase the phosphorus contents in the soil solution; however it increased the levels of all other Pi fractions. The second experiment aimed to evaluate the effect of contact time of P rates applied on four alkaline soils of the semiarid region located between the Piranhas-Açu (RN) and Jaguaribe (CE) river valleys and to analyze the availability of this nutrient for maize plants. Samples were collected in the 0-30 cm layer in four soils of this region, afterwards, samples corresponding to a volume of 3.3 dm³ were weighed in black plastic bag, which received the doses of P (0, 100, 200 and 300 mg dm⁻³) as KH₂PO₄ and incubated for different periods (0, 15, 30, 60, 160, 260 and 360 days), adding a volume of deionized water corresponding to 50% of the total porosity of each soil. After the incubation period, the maize was sown and the experiment was carried out in a randomized block design in a factorial scheme (4 soils × 7 incubation times × 4 doses) and three replications, totaling 336 experimental units. Thirty days after sowing, the plants were cut for analysis. Analysis of variance and regression were performed to evaluate the effect of P doses and incubation time on P content recovered by soil extractor, plant P content and dry matter. In all soils studied, soil P levels increased with increasing P rates. As contact time increased, plant phosphorus levels decreased during the first 30 to 60 days after incubation, and continued to decrease up to 120 days, but then tended to stabilize at the longest contact times of the phosphorus with the soils. The four soils studied, although presenting variations of phosphorus capacity factor (CPF), did not show many differences among them regarding the minimum and maximum estimated dry matter yield of maize plants.

Key words: phosphorus availability, phosphorus capacity factor, calcareous soils.

SUMÁRIO

	Pág.
INTRODUÇÃO GERAL.....	11
LITERATURA CITADA.....	13
CAPÍTULO 1.....	14
FRAÇÕES DE FÓSFORO INORGÂNICO DE SOLOS DO SEMIÁRIDO E SUAS RELAÇÕES COM MEDIDAS DO FATOR CAPACIDADE DE FÓSFORO DO SOLO.....	15
RESUMO.....	15
ABSTRACT.....	16
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4. CONCLUSÕES.....	29
5. LITERATURA CITADA.....	29
CAPÍTULO 2.....	33
DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS ALCALINOS EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA E DO TEMPO DE CONTATO DO FÓSFORO COM OS SOLOS.....	34
RESUMO	34
ABSTRACT.....	35
1. INTRODUÇÃO.....	36
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4. CONCLUSÕES.....	50
5. LITERATURA CITADA.....	50
ANEXOS.....	53

INTRODUÇÃO GERAL

O fósforo (P) é um macronutriente que, apesar de não ser exigido em grande quantidade pelas plantas, como o N e o K, é o mais estudado devido à sua baixa disponibilidade nos solos, cujas causas estão relacionadas à sorção deste elemento, que englobam os processos de adsorção e de precipitação (Novais & Smith, 1999).

Para um melhor entendimento da disponibilidade de P no solo, vários métodos de fracionamento têm sido desenvolvidos. O fracionamento do fósforo inorgânico (Pi) é importante para a avaliação da forma que ele está sorvido ao solo, e com isso poder relacionar à sua disponibilidade para as plantas em diferentes tipos de solos.

As formas inorgânicas de P são estudadas principalmente pelo fracionamento proposto por Chang & Jackson (1957), que consiste na estimativa das formas de fósforo no solo por diferentes soluções extratoras. A utilização dessas soluções ocorre de acordo com seu modo de ação em extrair seletivamente as diferentes formas de fósforo de maneira sequencial, do menor para o maior poder de extração (Ranno et al., 2007).

Da mesma forma, o tempo de contato do P com o solo tem um papel fundamental na disponibilidade desse elemento. Segundo Santos et al. (2008), com o decorrer do tempo, pode haver o envelhecimento do fósforo adsorvido, cujas ligações tendem à especificidade, fazendo com que o P se ligue a compostos binucleados ou ainda a penetração do fosfato nas imperfeições do mineral cristalizado. Isso resulta em maior força de adsorção e menor possibilidade de dessorção do fosfato para a solução do solo. Santos et al. (2016) avaliaram a disponibilidade de fósforo em função do tempo de contato com diferentes solos da Paraíba e verificaram que o aumento no tempo de contato de P com os solos diminui a disponibilidade de P para as plantas e que nos solos estudados, há uma pequena alteração de P lábil para P não-lábil, ou o P não-lábil formado é liberado mais tarde à solução do solo.

O efeito do tempo está relacionado com a reatividade da fonte de P, solubilidade, e às propriedades do solo. Ramos et al. (2010) relatam que o estudo da disponibilidade de P em função do tempo de contato com o solo fornece informações importantes que levam a um manejo diferente das culturas em relação ao período de aplicação de fertilizantes, já que seu efeito residual permitiria a redução nos custos de produção.

Na região Nordeste ocorrem diferentes classes de solos, desde os mais desenvolvidos aos menos desenvolvidos, todavia, os que predominam nessa região são os menos desenvolvidos, com pH alcalino e ricos em cálcio. Os solos pouco desenvolvidos dessa região apresentam elevados teores de fósforo ligado a cálcio, forma de P que teoricamente não é disponível para as plantas. Esses solos

apresentam reação neutra e com elevada saturação por bases, ocasionando a precipitação e dissolução de fosfatos de cálcio (Salcedo, 2006).

Devido à grande importância para aumentar a eficiência das adubações fosfatadas, pesquisas quanto ao fracionamento e tempo de contato do P no solo têm crescido muito nos últimos anos no Brasil, no entanto os solos do semiárido brasileiro ainda não foram muito bem estudados. Trabalhos assim são muito realizados na região sul do país, mas os solos predominantes nessa região apresentam características químicas e mineralógicas muito diferentes dos solos do semiárido nordestino, sendo os solos da região sul mais desenvolvidos apresentando-se na sua maioria com baixo pH, ricos em óxidos de Fe e Al e pobres em cálcio.

A região compreendida entre os vales dos rios Piranhas-Açu, no Rio Grande do Norte, e o Rio Jaguaribe, no Ceará, é uma região que se destaca na prática da agricultura de sequeiro e na agricultura irrigada. Neste cenário se destacam o Tabuleiro de Russas (CE), o vale do Rio Piranhas-Açu (RN) e, principalmente, a Chapada do Apodi (CE e RN), pela qualidade dos solos e pela oferta de água para irrigação.

A realização de pesquisas sobre o fracionamento e o tempo de contato de P em solos do semiárido, especialmente naqueles mais alcalinos e ricos em cálcio, se justifica para que se tenha um melhor entendimento da dinâmica do P nesses solos. Além disso, pesquisas nessa temática contribuirão para a melhoria das práticas de avaliação e correção da disponibilidade de P nos solos da região semiárida localizada entre os vales dos Rios Piranhas-Açu (RN) e o Rio Jaguaribe (CE).

Diante do exposto, objetivou-se, com este trabalho: a) quantificar os teores das frações de Pi (P-H₂O, P-Al, P-Fe e P-Ca) em nove solos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Piranhas-Açu (RN) e Jaguaribe (CE) e correlacioná-los com as medidas do fator capacidade de fósforo desses solos; b) avaliar o efeito do tempo de contato de doses de P aplicadas em quatro solos alcalinos da mesma região, e analisar a disponibilidade desse nutriente para as plantas de milho.

LITERATURA CITADA

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

Novais, R. F.; Smyth, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

Ramos, S. J.; Faquin, V.; Rodrigues, C. R.; Silva, C. A. Efeito residual das aplicações de fontes de fósforo em gramíneas forrageiras sobre o cultivo sucessivo da soja em vasos. *Bragantia*, v.69, p.149-155, 2010.

Ranno, S. K.; Silva, L. S.; Mallmann, F. J. K. Fracionamento do fósforo inorgânico em solos de várzea do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrociência*, v.13, p.47-54, 2007.

Salcedo, I. H. Biogeoquímica do fósforo em solos da região semi-árida do NE do Brasil. *Revista de Geografia*, v. 23, p. 108-123, 2006.

Santos, D. R. dos; 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.

Santos, H. C.; Oliveira, F. H. T. de; Souza, A. P. de; Salcedo, I. H.; Silva, V. D. M. Phosphorus availability as a function of its time of contact with different soils. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20. n. 11, p. 996-1001. 2016.

CAPÍTULO 1

FRAÇÕES DE FÓSFORO INORGÂNICO DE SOLOS DO SEMIÁRIDO E SUAS CORRELAÇÕES COM MEDIDAS DO FATOR CAPACIDADE DE FÓSFORO DO SOLO

RESUMO

A compreensão da dinâmica das formas do fósforo inorgânico nos solos é fundamental para o aperfeiçoamento da adubação fosfatada nos solos de uma região, entretanto são poucos os estudos na região semiárida do Nordeste brasileiro. Objetivou-se com este trabalho quantificar os teores das frações de fósforo inorgânico em solos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Piranhas-Açu (RN) e Jaguaribe (CE) e correlacioná-los com as medidas do fator capacidade de fósforo desses solos. Foram coletadas amostras na camada de 0-30 cm em nove solos representativos dessa região. Amostras desses solos correspondentes a um volume de 2 dm³ foram pesadas em saco plástico preto e receberam duas doses de P de acordo com fósforo remanescente (zero e 65; zero e 90; zero e 115 mg dm⁻³) aplicadas e homogeneizadas em 100% do volume de solo de cada saco plástico, estas foram incubadas por um período de 30 dias, adicionando-se água deionizada em quantidade correspondente a 50% da porosidade total de cada solo. Após esse período de incubação, foi realizado o fracionamento do P inorgânico. A capacidade máxima de sorção de fosfato (CMSP) apresentou correlação elevada com os valores de fósforo remanescente (P-rem), indicando que este pode ser usado como medida para se estimar o fator capacidade de fósforo (FCP) desses solos. Os valores de capacidade máxima de sorção de fósforo (CMSP) também se correlacionaram com os teores de Fe₂O₃ e de Ca²⁺, e com os valores de pH. Isso evidencia que a sorção do fósforo nesses solos é explicada não somente pela adsorção do fósforo às superfícies dos óxidos de ferro, mas também pela precipitação do fósforo com Ca²⁺ em solos alcalinos e ricos em Ca²⁺. Após a adubação fosfatada não houve a formação do P-Ca nos três solos ácidos e com teores mais baixos de Ca²⁺. Também não aumentou os teores do fósforo na solução dos solos estudados, mas aumentou os teores de todas as demais frações do fósforo inorgânico.

Palavras chaves: fracionamento, disponibilidade de fósforo, solos calcários.

INORGANIC PHOSPHORUS FRACTIONS OF SEMI-ARID SOILS AND THEIR CORRELATIONS WITH SOIL PHOSPHORUS FACTOR MEASURES

ABSTRACT

Understanding the dynamics of inorganic phosphorus forms in soils is essential for the improvement of phosphate fertilization in the soils of a region, but there are few studies in the semiarid region of Brazilian northeastern. The objective of this work was to quantify the levels of inorganic phosphorus fractions in soils of the semiarid region located between the Piranhas-Açu (RN) and Jaguaribe (CE) river valleys and to correlate them with the phosphorus capacity factor measurements of these soils. Samples were collected in the 0-30 cm layer in nine representative soils of this region. Samples of these soils corresponding to a volume of 2 dm³ were weighed in a black plastic bag and received two doses of P according to remaining phosphorus (zero and 65; zero and 90; zero and 115 mg dm⁻³) applied and homogenized in 100% of the soil volume of each plastic bag. They were incubated for a period of 30 days, adding deionized water corresponding to 50% of the total porosity of each soil. After this incubation period, inorganic P fractionation was performed. The maximum phosphate sorption capacity (MPSC) showed a high correlation with the remaining phosphorus values (P-rem), indicating that it can be used as a measure to estimate the phosphorus capacity factor (FCP) of these soils. The maximum phosphorus sorption capacity (MPSC) values also correlated with Fe₂O₃ and Ca²⁺ contents, and with pH values. This shows that phosphorus sorption in these soils is explained not only by phosphorus adsorption to iron oxide surfaces, but also by phosphorus precipitation with Ca²⁺ in alkaline and Ca²⁺ rich soils. After phosphate fertilization, there was no formation of P-Ca in the three acid soils with lower Ca²⁺ contents, neither it increased the phosphorus contents in the studied soil solution, but it did increase the contents of all other inorganic phosphorus fractions.

Key words: fractionation, availability of phosphorus, calcareous soils.

1. INTRODUÇÃO

O P é encontrado no solo em diferentes formas que variam de acordo com a natureza química do ligante e com a energia de ligação entre o nutriente e o solo, dependendo do grau de desenvolvimento. Quanto à natureza do ligante, o P pode ser encontrado como P orgânico (Po) e P inorgânico (Pi) em ligações com Fe, Al, Ca, argilas silicatadas (Caulinita) e óxidos de Fe e de Al (Goethita, Hematita e Gibbsita). Assim, as diferentes frações de P do solo apresentam diferentes capacidades de desorção e reposição da solução do solo, segundo sua natureza química e energia de ligação (Souza Júnior et al., 2012).

O fracionamento é um método que tem sido utilizado para quantificar esses reservatórios, determinando as várias frações de P no solo de acordo com o seu grau decrescente de disponibilidade para as plantas, usando, sequencialmente, extratores de menor à maior força de extração. Entre os métodos de fracionamento, o mais conhecido é o de Chang & Jackson (1957), que permite quantificar as diversas frações de fósforo inorgânico do solo solúvel em água (P-H₂O), fósforo ligado a alumínio (P-Al), fósforo ligado a ferro (P-Fe) e fósforo ligado ao cálcio (P-Ca).

As frações de Pi apresentam comportamentos distintos com o avanço pedogenético do solo. Solos mais desenvolvidos, predominantes no Brasil, geralmente apresentam como características principais, pH ácido, lixiviação de bases trocáveis, como por exemplo o Ca²⁺ e cargas elétricas positivas no solo. Nos solos com valores de pH ácido comumente observado em áreas agrícolas brasileiras, encontram-se na superfície dos óxidos de Fe e Al, cargas elétricas positivas capazes de reter vários tipos de ânions, sendo o íon fosfato preferencialmente adsorvido, mesmo a baixos níveis de P na solução do solo (Pozza et al., 2007; Novais et al., 2007; Lacerda et al., 2013). Portanto nesses solos predominam as frações de fósforo inorgânico precipitados com íons de Fe (P-Fe) e Al (P-Al) presentes na solução do solo. Entretanto, em solos menos desenvolvidos, com pH alcalino, com altas concentrações de Ca²⁺ em solução, material de origem calcária ou a aplicação de uma calagem excessiva, pode ocasionar precipitação dos fosfatos predominantemente com o Ca²⁺. O produto da precipitação desses elementos forma a fração inorgânica P-Ca, que apresenta baixa solubilidade e, conseqüentemente, menor disponibilidade para a planta que o P-Al formado em solos ácidos (Santos, et al., 2011).

Os solos da região Nordeste do Brasil, especialmente da região semiárida, apresentam características químicas, físicas e mineralógicas diferentes daqueles observados em outras regiões do país. Na região Nordeste ocorre diferentes classes de solos, desde os mais desenvolvidos aos menos desenvolvidos. Bastos et al. (2012) relatam que em geral os solos da região semiárida nordestina são rasos e pouco desenvolvidos, possuem pH alcalino, baixos teores de matéria orgânica, sendo que a maioria desses solos apresentam elevada fertilidade natural. Os solos pouco desenvolvidos da região

semiárida do Nordeste brasileiro apresentam elevados teores de fósforo ligado a Ca, forma de P que não é disponível para as plantas. Esses solos apresentam reação neutra e com elevada saturação por bases, ocasionando a precipitação e dissolução de fosfatos de Ca. Em contrapartida, nos solos com maior grau de desenvolvimento dessa região, de reação ácida e com baixa saturação por bases, as principais formas de P estão relacionadas aos óxidos de Fe e Al, com o predomínio das formas P-Fe e P-Al dependendo da natureza química, física e mineralógica desses solos (Souza Júnior et al., 2012).

São escassos os estudos no semiárido brasileiro em relação ao fracionamento de fósforo inorgânico, especialmente sobre a influência da forma P-Ca, relacionada a disponibilidade de fósforo as plantas desse ambiente. Trabalhos realizados nessa região (Farias et al., 2009a,b; Santos et al., 2011), estudaram a dinâmica de fósforo com ênfase a sorção e disponibilidade desse elemento no solo. Esses trabalhos foram realizados em doze solos representativos do Estado da Paraíba com graus de desenvolvimento pedogenéticos diferentes, revelaram que nesses solos o “problema” da sorção de fósforo existe, mas a magnitude desta sorção é pequena quando comparado ao que ocorre nos solos de outras regiões do Brasil (Novais & Smyth, 1999; Novais et al., 2007).

Diante do exposto, a realização de pesquisas sobre o fracionamento de Pi em solos do semiárido, especialmente naqueles mais alcalinos e ricos em cálcio, se justifica para que se tenha um melhor entendimento da dinâmica do Pi nesses solos, principalmente a forma de fósforo ligada ao cálcio. Além disso, pesquisas nessa temática contribuirão para a tomada de decisão sobre a necessidade de adição e para a definição das doses de fertilizantes fosfatados nesses solos.

Neste trabalho, objetivou-se quantificar os teores das frações de Pi (P-H₂O, P-Al, P-Fe e P-Ca) em solos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Piranhas-Açu (RN) e Jaguaribe (CE) e correlacioná-los com as medidas do fator capacidade de fósforo desses solos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este experimento foi desenvolvido com nove solos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Piranhas-Açu (RN) e Jaguaribe (CE) (Figura 1), sendo esses solos: RQ = Neossolo Quartzarênico (Russas-CE); LVA = Latossolo Vermelho-Amarelo (Mossoró-RN); PVA1 = Argissolo Vermelho-Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háptico (Afonso Bezerra-RN); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN); CX2 = Cambissolo Háptico (Baraúna-RN); CX3 = Cambissolo Háptico (Quixeré-CE); PVA2 = Argissolo Vermelho-Amarelo (Apodi-RN).

A escolha dos solos teve como base a importância econômica destes para a agricultura. A região compreendida entre os vales dos rios Piranhas Açu, no Rio Grande do Norte, e o Rio Jaguaribe, no Ceará, se destaca na prática da agricultura de sequeiro e da agricultura irrigada. Neste cenário, se

destacam o Tabuleiro de Russas (CE), o vale do rio Piranhas-Açu (RN) e, principalmente, a Chapada do Apodi (CE e RN), pela qualidade dos solos e pela oferta de água para a irrigação. Os materiais de origem mais comuns dos solos dessas áreas são de natureza sedimentar, compostos principalmente por calcário, arenito, sedimentos do grupo barreiras e sedimentos aluviais (DNPM, 1998).

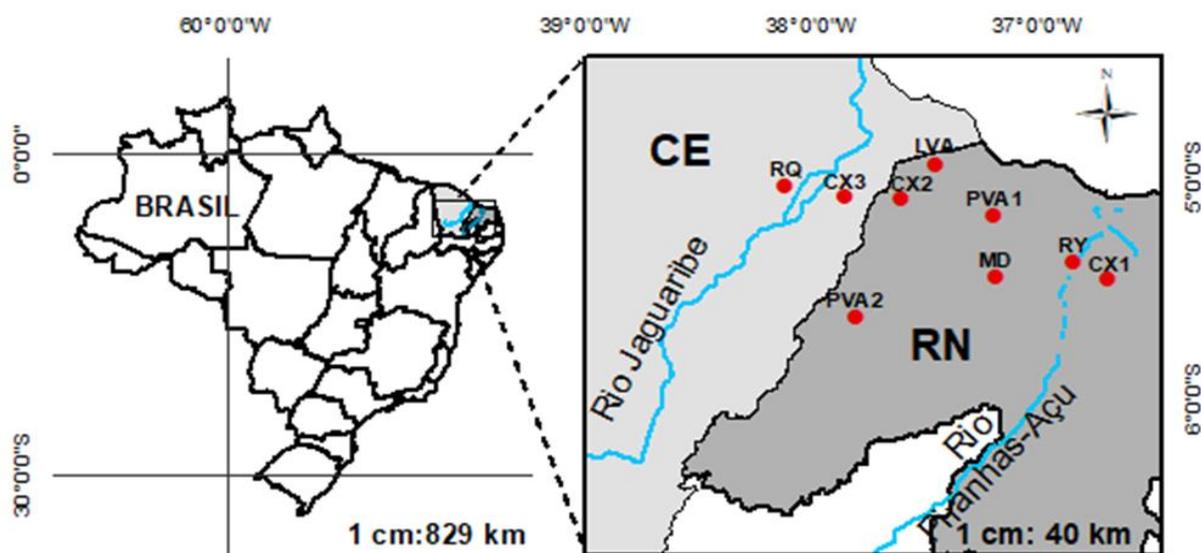


Figura 1. Distribuição espacial dos locais de coleta de solos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Piranhas-Açu (RN) e Jaguaribe (CE).

Foram coletadas amostras de nove solos na camada de 0-30 cm. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) e posteriormente levadas para o Laboratório de Fertilidade do Solo da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), para a caracterização química e física de acordo com Teixeira et al. (2017) (Tabela 1). As análises de fósforo remanescente (P-rem) foram feitas de acordo com Alvarez V. et al. (2000), em seguida realizou-se a dosagem do P no extrato por espectrofotometria de absorção molecular (Braga & Defelipo, 1974).

O experimento foi realizado em casa de vegetação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, onde foram pesadas amostras de solos correspondentes a um volume de 2 dm³ em saco plástico preto, as amostras receberam duas doses de P, aplicadas e homogêneas em 100% do volume de solo de cada saco plástico (2 dm³). Foram aplicadas as doses zero e 65 mg dm⁻³ de P aos solos RQ, LVA e PVA1; zero e 90 mg dm⁻³ de P aos solos RY, CX1, CX2 e PVA2; e as doses zero e 115 mg dm⁻³ de P aos solos MD e CX3. As doses foram definidas de acordo com o P-rem (Alvarez V. et al., 2000). Como fonte de P, foi utilizado o KH₂PO₄ p.a. em solução. Posteriormente, seguiu-se um período de incubação por trinta dias, adicionando-se água deionizada em quantidade correspondente a 50% da porosidade total de cada solo.

Após o período de incubação, os solos foram retirados dos sacos, secos ao ar, destorroados, passados em peneira de 2 mm de malha, armazenadas em pote plástico e levados para o laboratório de Fertilidade do solo da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) para a realização do fracionamento do P inorgânico.

Tabela 1 – Características físicas e químicas de nove solos do semiárido brasileiro⁽¹⁾

Característica	Solo ⁽²⁾								
	RQ	LVA	PVA1	RY	CX1	MD	CX2	CX3	PVA2
Areia (g kg ⁻¹)	920	940	850	640	680	290	660	380	520
Silte (g kg ⁻¹)	40	10	20	22	70	160	70	220	90
Argila (g kg ⁻¹)	40	50	130	140	250	550	270	400	390
Densidade solo (kg dm ⁻³)	1,64	1,59	1,57	1,35	1,39	1,20	1,42	1,37	1,38
CMS ⁽³⁾ (mg g ⁻¹)	0,050	0,087	0,101	0,077	0,383	0,880	0,436	0,884	0,454
P-rem ⁽⁴⁾ (mg L ⁻¹)	57,9	58,8	52,1	49,1	22,7	12,1	33,0	11,6	25,9
Fe ₂ O ₃ ⁽⁵⁾ (g kg ⁻¹)	1,86	2,14	12,69	45,23	23,01	72,86	47,07	121,39	44,12
Fe cristalino ⁽⁶⁾ (g kg ⁻¹)	0,07	0,49	7,17	1,81	8,79	20,76	17,57	40,46	23,42
Fe amorfo ⁽⁷⁾ (g kg ⁻¹)	0,12	0,32	0,80	2,03	1,25	2,73	0,47	1,81	1,22
pH	5,6	4,6	4,1	6,5	6,7	7,6	6,6	6,7	7,5
Mat. Org. (g kg ⁻¹)	5,1	2,4	7,5	6,2	9,1	14,4	9,4	11,0	5,5
P-Mehlich-1 (mg dm ⁻³)	5,0	3,3	4,2	60,7	2,0	3,1	4,5	4,8	3,7
K ⁺ (mg dm ⁻³)	53,3	16,7	35,7	137,3	184,3	185,8	144,8	149,5	233,9
Na ⁺ (mg dm ⁻³)	8,5	7,6	20,1	133,1	20,9	47,1	54,0	116,3	40,0
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,89	0,24	0,74	6,94	12,23	40,33	6,04	11,50	9,33
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,73	0,25	0,29	3,10	1,68	4,77	1,17	1,29	3,03
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,10	0,24	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(H+Al) (cmol _c dm ⁻³)	1,71	1,23	4,02	1,19	1,81	0,15	1,58	1,97	0,13
SB (cmol _c dm ⁻³)	1,79	0,56	1,20	10,97	14,47	45,78	7,81	13,68	13,13
t (cmol _c dm ⁻³)	1,89	0,80	1,81	10,97	14,47	45,78	7,81	13,68	13,13
CTC (cmol _c dm ⁻³)	3,50	1,79	5,22	12,16	16,28	45,93	9,39	15,65	13,26
V (%)	51	31	23	90	89	100	83	87	99
m (%)	5	30	34	0	0	0	0	0	0
PST (%)	1	2	2	5	1	0	3	3	1

⁽¹⁾Análises químicas e físicas realizadas de acordo com Teixeira et al. (2017). ⁽²⁾RQ = Neossolo Quartzarênico (Russas-CE); LVA = Latossolo Vermelho-Amarelo (Mossoró-RN); PVA1 = Argissolo Vermelho-Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Afonso Bezerra-RN); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX3 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); PVA2 = Argissolo Vermelho-Amarelo (Apodi-RN). ⁽³⁾ Capacidade máxima de sorção de fosfato. ⁽⁴⁾P-rem = fósforo remanescente (Alvarez V. et al., 2000). ⁽⁵⁾Ferro extraído com ataque sulfúrico da TFSA. ⁽⁶⁾Diferença entre o ferro extraído com Ditionito-citrato-bicarbonato e o ferro amorfo extraído com oxalato de amônio. ⁽⁷⁾Ferro amorfo extraído com oxalato de amônio.

Nas amostras foi realizado o fracionamento sequencial do P inorgânico proposto originalmente por Chang & Jackson (1957), seguindo-se a metodologia descrita em Kuo (1996), com algumas modificações conforme descrito a seguir.

Extração do Pi facilmente solúvel (P-H₂O):

Foram colocados 0,5 g de solo (TFSA) em um erlenmeyer de 125 mL contendo 25 mL de NH₄Cl 1 mol L⁻¹ e depois agitou-se durante 30 minutos em agitador horizontal. Passado esse período a suspensão foi centrifugada durante 5 minutos a 1.800 rpm, o sobrenadante filtrado em papel de filtro e transferido para balão volumétrico de 50 mL, que teve seu volume completado com água deionizada (Extrato A). Depois se determinou a concentração de P no extrato A e calculou-se o teor de P-H₂O no solo.

Extração do Pi ligado ao alumínio (P-Al):

O resíduo de solo do tubo de centrífuga foi transferido para um erlenmeyer de 125 mL, no qual foram adicionados 25 mL de NH₄F 0,5 mol L⁻¹ (pH 8,2) e depois a suspensão agitada por uma hora. Após esse período a suspensão foi centrifugada durante cinco minutos a 1.800 rpm, o sobrenadante filtrado em papel de filtro e transferido para balão volumétrico de 50 mL (Extrato B). O resíduo de solo foi lavado uma vez com porção de 25 mL de NaCl saturado e depois centrifugado. Essa solução de lavagem foi misturada com o Extrato B e o volume ajustado para 50 mL com água deionizada, no qual foi determinada a concentração de P e calculado o teor de P-Al no solo.

Extração do Pi ligado a ferro (P-Fe):

O resíduo de solo do tubo de centrífuga foi transferido para um erlenmeyer de 125 mL, no qual foram adicionados 25 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ e depois a suspensão agitada por 17 horas. Após esse período a suspensão foi centrifugada durante 10 minutos a 1.800 rpm, o sobrenadante filtrado em papel de filtro e transferido para balão volumétrico de 50 mL (Extrato C). O resíduo de solo foi lavado uma vez com porção de 20 mL de NaCl saturado e depois centrifugado. Essa solução de lavagem foi misturada com o extrato C. Como o Extrato C sempre ficou turvo, adicionaram-se 4 mL de H₂SO₄ 1 mol L⁻¹ e em seguida a suspensão foi centrifugada durante 10 minutos a 1.800 rpm. Quando foi necessário, adicionou-se cerca de 4 gotas de H₂SO₄ concentrado e em seguida a suspensão foi centrifugada novamente durante 10 minutos a 1.800 rpm, até a floculação completa dos coloides. Depois o extrato C foi filtrado em papel de filtro para obtenção de um extrato C límpido, e em seguida transferido para o balão volumétrico de 50 mL, sendo o volume ajustado com água deionizada. Posteriormente determinou-se a concentração de P no extrato C e calculou-se o teor de P-Fe no solo.

Extração do Pi ligado a cálcio (P-Ca):

O resíduo de solo remanescente da extração do P-Fe foi transferido para um erlenmeyer de 125 mL, no qual foram adicionados 25 mL de H_2SO_4 0,25 mol L^{-1} e depois a suspensão agitada durante uma hora. Após esse período a suspensão foi centrifugada durante 10 minutos a 1.800 rpm, filtrada em papel de filtro e o sobrenadante transferido para balão volumétrico de 50 mL (Extrato D). O resíduo de solo foi lavado uma vez com porção de 25 mL de NaCl saturado e depois a suspensão foi centrifugada. Essa solução de lavagem foi misturada com o extrato D e o volume ajustado para 50 mL com água deionizada. Depois foi determinada a concentração de P no Extrato D e calculado o teor de P-Ca no solo.

A dosagem de P nos extratos foi feita por colorimetria, conforme Braga & Defelipo (1974). Para a dosagem do P-Al foi realizado a diluição do extrato com 10 mL do Extrato B, 2,5 mL de H_2SO_4 0,1 mol/L e 15 mL da solução de ácido bórico 0,8 mol/L. Para dosar o P-Fe foi realizado a diluição do extrato com 10 mL do Extrato C e 5,0 mL de H_2SO_4 0,1 mol/L. Os resultados em mg kg^{-1} foram transformados em mg dm^{-3} levando-se em conta os valores de densidade dos solos.

O P inorgânico total (Pi-total) foi obtido mediante a soma dos teores de P- H_2O , P-Al, P-Fe e P-Ca. Os dados foram tabulados e a média das três repetições calculada. Foram realizadas análises de correlação entre os teores das diferentes frações de P inorgânico dos solos as medidas do fator capacidade de fósforo.

A análise estatística consistiu das análises de correlação entre os teores das frações de Pi com as medidas do fator capacidade de fósforo desses solos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A capacidade máxima de sorção de fosfato (CMSP) apresentou correlação elevada ($r = -0,95$) com os valores de fósforo remanescente (P-rem) (Tabela 2), indicando que o P-rem pode ser usado como medida para se estimar o fator capacidade de fósforo (FCP) desses solos. O coeficiente de correlação entre CMSP e os teores de argila foram de $r = 0,94$, mostrando que nesses solos o teor de argila é tão eficiente quanto o P-rem para estimar o FCP dos solos. A correlação elevada entre os teores de argila e os valores de P-rem ($r = -0,94$) sugere que, nos solos estudados, a mineralogia da fração argila não tem tanta influência no FCP, sendo este mais dependente da quantidade de argila do solo.

Farias et al. (2009a), Vilar et al. (2010) e Arruda et al. (2017) verificaram correlação significativa do P-rem com a CMSP dos solos. Da mesma forma, Corrêa et al. (2011), estudando dez solos de Pernambuco, observaram correlação significativa entre CMSP e argila, assim como entre CMSP e P-rem. Oliveira et al. (2014) verificaram que o valor da CMSP foi proporcional ao teor de

argila, comportamento semelhante ao observado em outros trabalhos (Valladares et al., 2003; Falcão & Silva, 2004; Ranno et al., 2007a). Por outro lado, Broggi et al. (2011), Chaves et al. (2009), e Rolim Neto et al. (2004), não encontraram correlação significativa entre teor de argila e a CMSP concluindo que não somente a quantidade, mas também a qualidade dos constituintes minerais da fração argila interferem no “status” de P dos solos.

Tabela 2 – Coeficientes de correlação linear simples entre características químicas e físicas do solo que refletem o fator capacidade de fósforo em solos do semiárido

Característica	CMSP	P-rem	Fe ₂ O ₃	Fe-Crist.	Fe-Amorf.	pH	Ca ²⁺
Argila	0,94**	-0,94**	0,77*	0,81**	0,74*	0,80**	0,84**
CMSP ⁽¹⁾	-	-0,95**	0,87**	0,89**	0,66 ^{ns}	0,70*	0,77*
P-rem ⁽²⁾	-	-	-0,80**	-0,85**	-0,68*	-0,79*	-0,74*
Fe ₂ O ₃ ⁽³⁾	-	-	-	0,90**	0,69*	0,62 ^{ns}	0,53 ^{ns}
Fe-Crist. ⁽⁴⁾	-	-	-	-	0,46 ^{ns}	0,57 ^{ns}	0,43 ^{ns}
Fe-Amorf. ⁽⁵⁾	-	-	-	-	-	0,64 ^{ns}	0,82**
pH	-	-	-	-	-	-	0,68*

⁽¹⁾ Capacidade máxima de sorção de fosfato ⁽²⁾ P-rem = fósforo remanescente (Alvarez V. et al., 2000). ⁽³⁾Ferro extraído com ataque sulfúrico da TFSA. ⁽⁴⁾Diferença entre o ferro extraído com Ditionito-citrato-bicarbonato e o ferro amorfo extraído com oxalato de amônio. ⁽⁵⁾Ferro amorfo extraído com oxalato de amônio. * Significativo a 5%; ** Significativo a 1%; ^{ns} Não significativo

Os valores de CMSP também se correlacionaram com os teores de Fe₂O₃ (r = 0,87), Ca²⁺ (r = 0,77) e com os valores de pH (r = 0,70) (Tabela 2). Isso evidencia que a sorção de fósforo (P) nesses solos é explicada não somente pela adsorção de P às superfícies dos óxidos de ferro, mas também pela precipitação do P com Ca²⁺ em solos alcalinos e ricos em Ca²⁺. Particularmente em solos do semiárido, onde ocorre muitos solos com essas características, é muito importante considerar que a precipitação de P com Ca²⁺ talvez seja a maior responsável pela sorção de P nesses solos.

A tabela de recomendação de adubação utilizada nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (Silva et al., 2016) e do Paraná (Pauletti, & Motta, 2019) utilizam apenas o teor de argila do solo como medida do FCP, e a tabela de recomendação de adubação de Minas Gerais utiliza o teor de argila e o valor do P-rem (Ribeiro et al., 1999), entretanto, pelos resultados obtidos, pode-se inferir que para os solos do Estado do Rio Grande do Norte, tanto o teor de argila como o valor de P-rem podem ser utilizados para estimar o FCP dos solos.

Para as frações de Pi os teores de P facilmente solúvel (P-H₂O) na presença e na ausência de adubação fosfatada, e de P ligado a alumínio (P-Al) na ausência de adubação fosfatada foram muito

baixos e próximos de zero, que ficaram abaixo do limite de detecção do método analítico utilizado para analisar P. Essa ausência de leitura para as frações P-H₂O e P-Al na ausência de adubação fosfatada (Tabela 3) certamente está relacionada à baixa disponibilidade de P nos solos estudados (Tabela 1).

Mesmo na presença de adubação fosfatada, também não foi possível a obtenção de leitura para a fração P-H₂O (Tabela 3). Provavelmente, isso esteja relacionado à maior capacidade tampão de fosfato dos solos com maior FCP (RY, CX1, MD, CX2, CX3 e PVA2), os quais devem manter baixas concentrações de P na solução do solo. Porém, na presença de adubação fosfatada, esperava-se que nos solos de menor FCP (RQ, LVA e PVA1) fosse possível a obtenção de leituras para os teores de P-H₂O, o que não ocorreu. Souza Júnior et al. (2012) verificaram que os teores de P-H₂O foram baixos em todos os solos estudados e não aumentaram mesmo após a aplicação das doses de P, com exceção dos solos Neossolo Flúvico e Neossolo Regolítico, cujos valores de P-H₂O apresentaram um pequeno aumento. Em outros trabalhos (Ranno et al., 2007b; Souza et al., 2007) também foi verificado baixos teores de P-H₂O nos solos.

Na ausência de adubação fosfatada o teor de P-Fe no solo CX3 foi 26,06 mg dm⁻³ e no solo RY foi 28,73 mg dm⁻³, nos demais solos os teores de P-Fe variaram de 0,00 a 9,43 mg dm⁻³ (Tabela 3). Os teores de P-Fe representaram 61 a 66% dos valores de Pi-Total nativo dos solos PVA1, CX2 e CX3, nos demais esses valores foram baixos. Nos solos que não receberam adubação fosfatada, os teores de P-Fe não se correlacionaram bem com os teores de Fe₂O₃ (r = 0,60), Fe-Crist. (r = 0,30) e Fe-Amorf. (r = 0,39) (Tabela 4).

Os teores de P-Ca na ausência de adubação fosfatada foram iguais a 15,69, 16,46 e 179,25 mg dm⁻³ nos solos MD, CX3 e RY, respectivamente (Tabela 3). Para os demais solos, os teores de P-Ca variaram de 2,45 a 7,79 mg dm⁻³ e os percentuais da fração P-Ca em relação ao Pi-Total variaram de 34 a 100%, indicando que grande parte do P nativo desses solos está ligado à Ca²⁺. Sem adubação fosfatada, nos solos RQ, LVA, RY, CX1, MD e PVA2, o P-Ca representou a maior parte ou a totalidade do Pi-Total.

Tabela 3 – Teores⁽¹⁾ das frações de P inorgânico em solos do semiárido

Solo ⁽²⁾	Dose de P	Fração de P inorgânico				
		P-H ₂ O	P-Al	P-Fe	P-Ca	Pi-Total ⁽³⁾
----- mg dm ⁻³ -----						
RQ	0	0,00 (0) ⁽⁴⁾	0,00 (0)	0,00 (0)	2,82 (100)	2,82
	65	0,00 (0)	25,65 (93)	0,00 (0)	1,97 (7)	27,61
LVA	0	0,00 (0)	0,00 (0)	1,05 (30)	2,45 (70)	3,51
	65	0,00 (0)	24,82 (82)	2,90 (10)	2,38 (8)	30,10
PVA1	0	0,00 (0)	0,00 (0)	4,16 (61)	2,69 (39)	6,86
	65	0,00 (0)	31,72 (65)	12,88 (26)	4,22 (9)	48,82
RY	0	0,00 (0)	0,00 (0)	28,73 (14)	179,25 (86)	207,98
	90	0,00 (0)	48,48 (17)	48,75 (17)	188,20 (66)	285,43
CX1	0	0,00(0)	0,00 (0)	0,00 (0)	2,87 (100)	2,87
	90	0,00 (0)	34,58(46)	32,43 (44)	7,51 (10)	74,51
MD	0	0,00 (0)	0,00 (0)	0,53 (3)	15,69 (97)	16,22
	115	0,00 (0)	36,47 (36)	42,24 (42)	22,31 (22)	101,02
CX2	0	0,00 (0)	0,00 (0)	9,43 (66)	4,88 (34)	14,31
	90	0,00 (0)	20,89 (27)	43,42 (57)	11,90 (16)	76,22
CX3	0	0,00 (0)	0,00 (0)	26,06 (61)	16,46 (39)	42,52
	115	0,00 (0)	33,98 (23)	77,48 (54)	32,79 (23)	144,25
PVA2	0	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	7,79 (100)	7,79
	90	0,00(0)	26,55 (35)	37,66 (50)	11,11 (15)	75,32

⁽¹⁾Os valores iguais a 0,00 significam que eles são muito baixos, tendendo à zero, ficando abaixo do limite de detecção do método analítico utilizado. ⁽²⁾RQ = Neossolo Quartzarênico (Russas-CE); LVA = Latossolo Vermelho-Amarelo (Mossoró-RN); PVA1 = Argissolo Vermelho-Amarelo (Mossoró-RN); RY = Neossolo Flúvico (Carnaubais-RN); CX1 = Cambissolo Háplico (Afonso Bezerra-RN); MD = Chernossolo Rêndzico (Mossoró-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX3 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); PVA2 = Argissolo Vermelho-Amarelo (Apodi-RN). ⁽³⁾Pi-Total = P-H₂O + P-Al + P-Fe + P-Ca. ⁽⁴⁾ Valores entre parênteses são expressos em percentagem e referem-se à contribuição de cada fração de Pi para o Pi-total.

Tabela 4 – Coeficientes de correlação linear simples entre os teores de Pi inorgânico e características químicas e físicas de solos do semiárido

Característica	P-Al	P-Fe	P-Ca	Pi-Total
----- Na ausência de adubação fosfatada -----				
Argila	-	0,04 ^{ns}	-0,15 ^{ns}	-0,12 ^{ns}
CMSP ⁽¹⁾	-	0,14 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,19 ^{ns}
P-rem ⁽²⁾	-	-0,12 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,14 ^{ns}
Fe ₂ O ₃ ⁽³⁾	-	0,60 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,22 ^{ns}
Fe-Crist. ⁽⁴⁾	-	0,30 ^{ns}	-0,24 ^{ns}	-0,16 ^{ns}
Fe-Amorf. ⁽⁵⁾	-	0,39 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,45 ^{ns}
pH	-	0,13 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,15 ^{ns}
Ca ²⁺	-	-0,09 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,03 ^{ns}
P-Mehlich-1	-	0,70 [*]	0,99 ^{**}	0,98 ^{**}
----- Na presença de adubação fosfatada -----				
Argila	0,14 ^{ns}	0,70 [*]	-0,09 ^{ns}	0,16 ^{ns}
CMSP	0,07 ^{ns}	0,74 [*]	-0,18 ^{ns}	0,10 ^{ns}
P-rem	-0,15 ^{ns}	-0,78 [*]	0,12 ^{ns}	-0,17 ^{ns}
Fe ₂ O ₃	0,31 ^{ns}	0,94 ^{**}	0,21 ^{ns}	0,48 ^{ns}
Fe-Crist.	-0,04 ^{ns}	0,81 ^{**}	-0,17 ^{ns}	0,12 ^{ns}
Fe-Amorf.	0,75 [*]	0,68 [*]	0,48 ^{ns}	0,65 ^{ns}
pH	0,22 ^{ns}	0,67 [*]	0,19 ^{ns}	0,37 ^{ns}
Ca ²⁺	0,33 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,18 ^{ns}

⁽¹⁾ Capacidade máxima de sorção de fosfato ⁽²⁾ P-rem = fósforo remanescente (Alvarez V. et al., 2000). ⁽³⁾Ferro extraído com ataque sulfúrico da TFSA. ⁽⁴⁾Diferença entre o ferro extraído com Ditionito-citrato-bicarbonato e o ferro amorfo extraído com oxalato de amônio. ⁽⁵⁾Ferro amorfo extraído com oxalato de amônio. * Significativo a 5%; ** Significativo a 1%; ^{ns} Não significativo

A adubação fosfatada não aumentou os teores de P-H₂O nos solos estudados, mas aumentou os teores de todas as demais frações de Pi inorgânico (Tabela 3). Nos solos RQ, LVA e PVA1, que são ácidos e que possuem baixos teores de Ca²⁺ (Tabela 1), a maior parte do P aplicado formou P-Al, fração esta que representou 93, 82 e 65%, respectivamente, do Pi-Total desses solos (Tabela 3).

Dos nove solos estudados, os solos RQ, LVA e PVA1 são os únicos que continham Al³⁺ trocável (Tabela 1), o que explica a maior formação de P-Al nos mesmos. Nos solos RY, CX1, MD, CX2, CX3 e PVA2, que não possuíam Al³⁺ trocável (Tabela 1), os teores de P-Al variaram de 20,89 a 48,48 mg dm⁻³ (Tabela 3), o que representa 17 a 46% do Pi-Total. Por esses solos serem jovens e pouco desenvolvidos (Tabela 1), não se espera a ocorrência de gibsitita na fração argila e, conseqüentemente, é pouco provável que tenha ocorrido adsorção de P aos óxidos de alumínio. Também, pelo fato desses solos não conterem Al³⁺ trocável (Tabela 1), não deve ter havido de fato a formação de P-Al.

Na presença de adubação fosfatada, os teores de P-Al verificados nos solos RY, CX1, MD, CX2, CX3 e PVA2 estão associados a uma parte da fração P-Ca que pode ter sido extraída desses solos pelo ânion fluoreto (F⁻) do extrator NH₄F utilizado para extrair o P-Al. Em solos ricos em Ca²⁺, durante o processo de extração do P com o NH₄F, o ânion F⁻ não é seletivo para complexar somente Al³⁺, podendo também complexar o Ca²⁺ e, assim, contabilizar P-Ca como P-Al.

Em outros trabalhos, também verificou-se aumento do P-Al em solos ricos em Ca²⁺ pelo método de Chang & Jackson (1957), como Pereira & Faria (1978) estudando a disponibilidade de fósforo, aplicado em um vertissolo verificaram que os teores de P-Al passaram a predominar, atingindo alta proporção das demais frações. Amaizah et al. (2012) ao realizar o fracionamento do fósforo em solos calcários verificaram que a fertilização aumentou consideravelmente o conteúdo de P disponível, especialmente do P ligado ao Al, além de que a aplicação de maiores quantidades de fertilizantes de P resultou na dominância da fração P-Al nos solos estudados. Da mesma forma, Souza Júnior et al. (2012) estudando as frações de fósforo inorgânico nos solos Planossolo Háplico, Neossolo Flúvico e Vertissolo Háplico verificaram que onde esperava-se aumento dos teores de P-Ca, pelo fato de serem alcalinos e ricos em Ca²⁺, no entanto, a fração P-Al foi a que mais aumentou.

Em geral, os teores de P-Al dos solos adubados com P não se correlacionaram bem com características químicas e físicas dos solos relacionadas à adsorção de P (Tabela 4), reforçando a hipótese de que o P-Al formado nos solos ácidos (RQ, LVA e PVA1) seja devido a precipitação de P com Al³⁺, e o “P-Al” medido nos demais solos na verdade é P-Ca fruto da precipitação de P com Ca²⁺.

No caso do P-Fe na presença de adubação fosfatada, os teores foram muito baixos nos solos RQ, LVA e PVA1 (Tabela 3), o que era de se esperar, tendo em vista que esses solos são bastante hipoférricos, com teores de Fe₂O₃ variando de 1,86 a 12,69 g kg⁻¹ (Tabela 1). Nos demais solos, com

teores de Fe_2O_3 variando de 23,01 a 121,39 g kg^{-1} (Tabela 1), os teores de P-Fe variaram de 32,43 a 77,48 g kg^{-1} (Tabela 3), os quais representaram de 17 a 47% do Pi-Total.

Após a adubação fosfatada, os teores de P-Fe dos solos estudados se correlacionaram medianamente com os teores de argila ($r = 0,70$) e com os valores de CMSP ($r = 0,74$) e de P-rem ($r = -0,78$), mas apresentaram correlação elevada com os teores de Fe_2O_3 ($r = 0,94$) e de Fe-Crist. ($r = 0,81$). Isso sugere que a formação de P-Fe nesses solos está mais relacionada à adsorção de P às superfícies dos óxidos de ferro, do que com a precipitação de P com Fe^{3+} da solução do solo, até mesmo porque não se espera a presença de quantidades consideráveis de Fe^{3+} na solução dos solos com $\text{pH} \geq 6,5$ (RY, CX1, MD, CX2, CX3 e PVA2).

A adubação fosfatada não causou a formação de P-Ca nos três solos ácidos e com teores mais baixos de Ca^{2+} (RQ, LVA e PVA1) (Tabela 1). Nesses solos, os teores de P-Ca na presença de adubação fosfatada não chegam a 5,0 mg dm^{-3} , o que representou menos de 10% do Pi-Total deles (Tabela 3).

Pelo que já foi dito em relação à possível extração de P-Ca pelo fluoreto de amônio, e pelo fato de o solo RY apresentar pH igual a 6,5 e teor de Ca^{2+} de 6,94 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, acredita-se que a maior parte dos 48,48 mg dm^{-3} de P-Al no solo RY seja, de fato, P-Ca. Essa provável formação de P-Ca, possivelmente mascarada de P-Al por causa do fluoreto de amônio, também deve ter acontecido nos solos derivados de calcário (CX1, MD, CX2, CX3 e PVA2). Essa hipótese também é corroborada pelo fato de os teores e os percentuais (Tabela 3) de P-Al nesses solos serem maiores que os verificados para a fração P-Ca.

Em solos alcalinos e ricos em cálcio, a precipitação de P-Ca deve ser muito grande, talvez respondendo pela maior parte do Pi total nesses solos, uma vez que eles possuem baixos teores de óxidos de ferro e de alumínio. Carreira et al. (2006) estudando o fracionamento de P em solos alcalinos e ricos em Ca^{2+} , observaram que a fração de P-Ca domina sobre todas as outras frações, testados tanto em condições de campo como em vasos. Corroborando com Hadgu et al. (2014), que trabalhando com cinco solos ricos em Ca^{2+} da região semiárida de Tigray, na Etiópia, encontraram quantidades de P-Ca superiores às formas P-Fe e P-Al, em todos os solos estudados, com exceção dos solos arenosos. Da mesma forma, Lemos (2019) estudando a dinâmica de fósforo em solos de diferentes mineralogias verificou que em dois vertissolos a maior parte do Pi ocorreu na forma de P-Ca (62 e 54 %, respectivamente), estando condizente com a origem desses solos a partir de rochas calcárias, resultando em altos teores de Ca^{2+} . Outros autores também citam a importância do Ca^{2+} na precipitação do P da solução (Hu et al., 2005; Nolla & Anghinoni, 2006; Chaves et al., 2007; Farias et al., 2009a; Souza Júnior, 2012).

Nas análises de correlação não foram verificadas correlações significativas entre os teores de P-Ca e características dos solos relacionadas ao FCP (Tabela 4). Porém, chama a atenção a correlação

muito elevada entre os teores de P-Ca e os teores de P disponível extraído dos solos com o extrator Mehlich-1, o que evidencia a preferencialidade desse extrator em extrair P-Ca dos solos (Bortolon et al., 2009; Moreira & Malavolta, 2001; Silva & Raij, 1999; Raij & Diest, 1980).

4. CONCLUSÕES

Para os solos estudados pode-se usar tanto o teor de argila como o valor de P-rem como estimador do FCP.

Na presença de adubação fosfatada os teores de P-Al obtidos em solos ricos em Ca^{2+} , indicam que uma parte da fração P-Ca foi extraída dos solos pelo ânion fluoreto (F^-) do extrator NH_4F utilizado para extrair o P-Al.

Após a adubação fosfatada os teores de P-Fe indicam que sua formação está mais relacionada à adsorção de P às superfícies dos óxidos de ferro, do que com a precipitação de P com Fe^{3+} da solução do solo.

A adubação fosfatada não causou a formação do fósforo com o Ca^{2+} nos três solos ácidos e com teores mais baixos de Ca^{2+} , tampouco aumentou os teores do fósforo na solução dos solos estudados, mas promoveu o aumento dos teores de todas as demais frações do fósforo inorgânico.

O fracionamento sequencial do P_i proposto por Chang & Jackson (1957), não é adequado para solos alcalinos e ricos em Ca^{2+} , pelo fato do extrator NH_4F extrair, além do P-Al, também o P-Ca nesses solos, precisando substituí-lo por outro extrator para obtenção de resultados mais fidedignos do P-Al e P-Ca em solos alcalinos e ricos em Ca^{2+} .

5. LITERATURA CITADA

Alvarez V., V. H.; Novais, R. F.; dias, L. E.; Oliveira, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. Boletim Informativo. SBCS, v. 25, p. 27-32, 2000.

Amaizah, N. R.; Čakmak, D.; Saljnikov, E. Roglić, G.; Mrvić, V.; Krgović, R.; Manojlović, D. Fractionation of soil phosphorus in a long-term phosphate fertilization. Journal of the Serbian Chemical Society, v 77, p. 971-981, 2012.

Arruda, J. A. de; Estrela, J. W. de M.; Freire, J. L. de O.; Santos, S. J. de A. Fósforo remanescente em solos do Seridó Paraibano. Revista Principia, v. 35, p. 42-49, 2017.

Bortolon, L.; Gianello, C.; Schlindwein, J. A. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para o milho pelos métodos mehlich-1 e mehlich-3. Scientia Agraria, v. 10, p. 305-312, 2009.

Braga, J. M.; Defelipo, V. B. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. Revista Ceres, v. 21, p. 73-85, 1974.

- Broggi, F.; Oliveira, A. C. de; Freire, F. J.; Santos Freire, M. B. G. dos; Nascimento, C. W. A. do. Fator capacidade de fósforo em solos de Pernambuco mineralogicamente diferentes e influência do pH na capacidade máxima de adsorção. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, p. 77-83, 2011.
- Carreira, J. A.; Viñegla, B.; Lajtha, K. Secondary CaCO_3 and precipitation of P-Ca compounds control the retention of soil P in arid ecosystems. *Journal of Arid Environments*, v. 64, p. 460-473, 2006.
- Chang, S. C.; Jackson, M. L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*. v.84, p. 133-144, 1957.
- Chaves, L. H G.; Chaves, I. de B.; Mendes, J. da S. Adsorção de fósforo em materiais de Latossolos e Argissolo. *Revista Caatinga*, v. 20, p. 104-111, 2007.
- Chaves, L. H. G. et al. Características de adsorção de fósforo em argissolos, plintossolo e cambissolos do estado da Paraíba. *Engenharia ambiental*, v. 6, p.130-139, 2009.
- Corrêa, M. R.; Nascimento, C. W. A.; Rocha, A. T. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 33, p. 153-159, 2011.
- DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Escala 1:500.000. Natal, DNPM – 4º Distrito/UFRN/Petrobrás/CRM, 1998.
- Falcão, N. P. S.; Silva, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. *Acta Amazonica*, v. 34, p. 337-342, 2004.
- Farias, D. R.; Oliveira, F. H. T.; Santos, D.; Arruda, J. A.; Hoffmann, R. B.; Novais, R. F. Fósforo em solos representativos do estado da paraíba: I- isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:623-632, 2009a.
- Farias, D. R.; Oliveira, F. H. T.; Santos, D.; Arruda, J. A.; Hoffmann, R. B.; Novais, R. F. Fósforo em solos representativos do estado da paraíba: II- disponibilidade de fósforo para plantas de milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:633-646, 2009b.
- Hadgu, F.; Gebrekidan, H.; Kibret, K.; Yitaferu, B. Study of phosphorus adsorption and its relationship with soil properties, analyzed with Langmuir and Freundlich models. *Agriculture, forestry and fisheries*, vol. 3, p.40-51, 2014.
- Hu, C.; Zhang, T.; Huang, Y.; Dahab, M.; Surampalli, R. Effects of Long-Term Wastewater Application on Chemical Properties and Phosphorus Adsorption Capacity in Soils of a Wastewater Land Treatment. *Faculty Publications*. 7, 2005. *Environmental Science & Technology*, v. 39, p. 72407245, 2005.
- Kuo, S. Phosphorus. In: BIGHAM, J.M. *Methods of soil analysis: Chemical methods*. Madison, Soil Science Society America/American Society of Agronomy, 1996. Part. 3. p.869-919.
- Lacerda, J. J. J.; Furtini Neto, A. E.; Resende, A. V.; Santos, J. Z. L.; Carneiro, L. F.; Oliveira, C. H. C. Crop growth response and dynamics of inorganic phosphorus fractions after application of reactive Arad phosphate rock in oxisol with diferente land use histories. *African jornal of Agricultural Research*, v. 8, p. 3454-3461, 2013

- Lemos, J. de O. Dinâmica de fósforo em solos de diferentes mineralogias: Fracionamento, fontes e modos de aplicação para crescimento de *Brachiaria decumbens*. Recife: UFRP, 2019. 104p. Tese Doutorado
- Moreira, A.; Malavolta, E. Fontes, doses e extratores de fósforo em alfafa e centrosema. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.36, p.1519-1527, 2001.
- Nolla, A.; Anghinoni, I. Atividade e especiação química na solução afetadas pela adição de fósforo em Latossolo sob plantio direto em diferentes condições de acidez.. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 30, p. 955-963, 2006.
- Novais, R. F.; Smyth, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.
- Novais, R. F.; Smyth, T. J.; Nunes, F. N. Fósforo. In: Fertilidade do solo. Novais, R. F.; Alvarez V., V. H.; Barros, N. F. de; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B. E Neves, J. C. L. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap. 8, p. 471-550.
- Oliveira, C. M. B. de; Gatiboni, L. C.; Miquelluti, D. J.; Smyth, T. J.; Almeida, J. A. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia de ligação em latossolo Bruno em razão de diferentes ajustes do modelo de Langmuir. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, p.1805-1815, 2014.
- Pauletti, V.; Motta, A. C. V. Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná. 2. ed. Curitiba: NEPAR-SBCS, 2019. 289p.
- Pereira, J. R.; Faria, C. M. B. Disponibilidade de fósforo, aplicado em um vertissolo do médio são francisco, avaliada por métodos químicos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 2, p. 12-128, 1978.
- Pozza, A. A. A.; Curi, N.; Costa, E. T. S.; Guilherme, L. R. G.; Marques, J. J. G. S. M.; Motta, P. E. F. Retenção e dessorção competitivas de ânions inorgânicos em gibbsita natural de solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 42, p. 1627-1633, 2007.
- Raij, B. van; Diest, A. van. Phosphate supplying power of rock phosphates in an Oxisol. Plant and Soil, v. 55, p. 97-104, 1980.
- Ranno, S. K.; Silva, L. S.; Gatiboni, L. C.; Rhoden, A. C. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, p. 21-28, 2007a.
- Ranno, S. K.; Silva, L. S.; Mallmann, F. J. K. Fracionamento do fósforo inorgânico em solos de várzea do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Agrociência, v.13, p.47-54, 2007b.
- Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez V., V. H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª Aproximação. Viçosa: CFSEMG, 1999., 359p.
- Rolim Neto, F. C.; Schaefer, C. E. G. R.; Costa, L. M.; Corrêa, M. M.; Fernandes Filho, E. I.; Ibraimo, M. M. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, p.:953-964, 2004.

- Salcedo, I. H. Biogeoquímica do fósforo em solos da região semi-árida do NE do Brasil. *Revista de Geografia*, v. 23, p. 108-123, 2006.
- Santos, H. C.; Oliveira, F. H. T.; Salcedo, I. H.; Souza, A. P.; Silva, V. D. M. kinetics of phosphorus sorption in soils in the state of Paraíba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 1301-1310, 2011.
- Silva, F. C. da; Raij, B. V. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 34, n. 2, p. 267-288, 1999.
- Silva, L. S. da; Gatiboni, L. C.; Anghinoni, I; Sousa, R. O de. Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. SBCS-NRS, 2016. 376p.
- Souza, R. F.; Fraquin, V.; Andrade, A. T.; Torres, P. R. F. Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 1535-1544, 2007.
- Souza Júnior, R. F. de; Oliveira, F. H. T de; Santos, H. C.: Freire, F. J.; Arruda, J. A. de. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 159-169, 2012.
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017, 573 p.
- Valladares, G. S.; Pereira, M. G.; Anjos, L. H. C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. *Bragantia*, v. 62, p. 111-118, 2003.
- Vilar, C. C.; Costa, A. C. S. da; Hoepers, A.; Souza Junior, I. G. de. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p. 1059-1068, 2010.

CAPÍTULO 2

DISPONIBILIDADE E TEMPO DE CONTATO DO FÓSFORO EM SOLOS ALCALINOS EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA

RESUMO

O estudo do fósforo no solo e na planta em diferentes períodos de contato é importante para a tomada de decisão sobre a necessidade de adubação e para a definição das doses de fertilizantes fosfatados, entretanto são poucos os estudos na região semiárida do Nordeste brasileiro. Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito do tempo de contato de doses de P aplicadas em quatro solos alcalinos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Piranhas-Açu (RN) e Jaguaribe (CE) e analisar a disponibilidade desse nutriente para as plantas de milho. Foram coletadas amostras na camada de 0-30 cm, em quatro solos representativos dessa região. Posteriormente, foram pesadas amostras correspondentes a um volume de 3,3 dm³ em saco plástico preto, as quais receberam doses de P (0, 100, 200 e 300 mg dm⁻³) na forma de KH₂PO₄ e foram incubadas por diferentes períodos (0, 15, 30, 60, 160, 260 e 360 dias), adicionando-se um volume de água deionizada correspondente a 50% da porosidade total de cada solo. Após o período de incubação o milho foi semeado e o experimento foi realizado em delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial (4 solos × 7 tempos de incubação × 4 doses) e três repetições, totalizando 336 unidades experimentais. Trinta dias após a semeadura foi realizado o corte das plantas para as análises. Foram realizadas análise de variância e regressão para avaliar o efeito de doses de P e do tempo de incubação no teor de P recuperado pelo extrator no solo, no conteúdo de P na planta e matéria seca. A variação dos teores do fósforo no solo está em consonância com as estimativas da capacidade máxima de sorção de fósforo (CMSP) dos solos estudados, pois a recuperação do fósforo do solo pelo extrator Mehlich-1 foi maior nos solos de menor capacidade máxima de sorção de fósforo (CMSP), e menor nos solos de maior capacidade máxima de sorção de fósforo (CMSP). Em todos os solos estudados, os teores de P no solo extraídos com o extrator Mehlich-1 aumentaram com o aumento das doses de P, no entanto o aumento do tempo de contato do P com o solo teve pouca influência nos teores de P no solo. Com o aumento do tempo de contato, os teores de fósforo na planta caíram muito nos primeiros 30 a 60 dias após a adubação, continuaram caindo até 120 dias de incubação, mas depois tenderam a se estabilizarem nos maiores tempos de contato do fósforo com os solos.

Palavras-chave: sorção; fator capacidade de fósforo; semiárido.

PHOSPHORUS AVAILABILITY AND CONTACT TIME IN ALKALINE SOILS DUE TO PHOSPHATE FERTILIZATION

ABSTRACT

The study of phosphorus in soil and plant in different contact periods is important to make the decision about the need for fertilization and to define the doses of phosphate fertilizers, but there are few studies in the semiarid region of northeastern Brazil. The objective of this study was to evaluate the effect of contact time of P rates applied in four alkaline soils of the semiarid region located between the Piranhas-Açu (RN) and Jaguaribe (CE) river valleys and to analyze the availability of this nutrient for maize plants. Samples were collected in the 0-30 cm layer in four representative soils of this region. Subsequently, samples corresponding to a volume of 3.3 dm³ in a black plastic bag were weighed, receiving doses of P (0, 100, 200 and 300 mg dm⁻³) as KH₂PO₄ and incubated for different periods (0, 15, 30, 60, 160, 260 and 360 days) by adding a volume of deionized water corresponding to 50% of the total porosity of each soil. After the incubation period, the maize was sown and the experiment was carried out in a randomized block design in a factorial scheme (4 soils × 7 incubation times × 4 doses) and three replications, totaling 336 experimental units. The plants were collected 30 days after sowing. The variation of soil phosphorus contents is according to the estimates of the maximum phosphorus sorption capacity (PBMC) of the studied soils, since the soil phosphorus recovery by Mehlich⁻¹ extractor was higher in soils with lower phosphorus maximum sorption capacity, and lower in soils with higher maximum phosphorus sorption capacity. In all soils studied, soil P content extracted with Mehlich⁻¹ extractor increased with increasing P rates, however the increase of P contact time with soil had little influence on soil P content. As contact time increased, phosphorus levels in the plant dropped sharply in the first 30 to 60 days after fertilization, continued to fall until 120 days of incubation, but then tended to stabilize at longer phosphorus contact times.

Keywords: sorption; phosphorus capacity factor; semiarid.

1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é considerado um macronutriente para as plantas, sua concentração na solução do solo afeta seu crescimento, de modo que as limitações na disponibilidade de P no início do ciclo vegetativo podem resultar em restrições no seu desenvolvimento, comprometendo a produção.

O solo apresenta três reservatórios principais de P: o P em solução, que está prontamente disponível para as plantas; o P lábil, que faz parte da fase sólida do solo e que está em equilíbrio com o P solução; e o P não lábil, que é o P da fase sólida que não está em equilíbrio com o P da solução e cuja disponibilidade para a planta tende a ser bem reduzida (Novais & Smith, 1999).

Novais & Smith (1999) descrevem que o suprimento de P para a fase líquida ocorre através de P lábil e a velocidade com que isso ocorre é uma função do fator de capacidade de fósforo do solo (FCP), também conhecido como capacidade tampão de fosfato, o qual é definido pela razão entre a quantidade de P adsorvida (Q) e P na solução (I), indicando a capacidade do solo de manter uma concentração constante de P na solução, que é influenciado pelas propriedades do solo, principalmente o conteúdo de argila e composição mineral e orgânica, que determina a energia das ligações entre o P e a fase sólida do solo.

A forma como o fósforo é encontrado no solo é influenciada principalmente pela sorção (adsorção e precipitação), sendo este processo considerado o mais importante no estudo sobre a disponibilidade e dinâmica do fósforo no solo (Oliveira et al., 2014). Os principais fatores que influenciam a sorção de P e a dessorção pelos solos incluem a argila e a sua mineralogia; a quantidade de óxidos amorfos de Al e Fe, carbonatos, e matéria orgânica presente no solo; e os efeitos da química da solução do solo (pH, força iônica, ânions concorrentes, status de redução-oxidação) nas fases sólidas, formas de P na solução (Sims & Pierzynski, 2005) a concentração de P na solução do solo (Pinto et al., 2013) e o tempo de contato do P com o solo, já que, quanto maior for este tempo de contato menor será a disponibilidade do elemento (Gonçalves et al., 1989).

Com o aumento do tempo de contato do fósforo com o solo, ocorre também aumento da energia de ligação desse elemento com os coloides, isso resulta em maior força das ligações e menor possibilidade de dessorção do fosfato para a solução do solo, conseqüentemente, esse elemento se torna menos disponível as plantas. Santos et al. (2016) relatam que o aumento no tempo de contato do P com os solos diminui a disponibilidade de P para as plantas, onde há uma alteração de P lábil para P não-lábil, ou o P não-lábil formado é liberado mais tarde à solução do solo. Segundo Wadt & Silva (2011) dependendo do tipo de solo, da fonte de fósforo utilizada na adubação e da qualidade da fração argila, bem como os teores de óxidos de Fe e Al, cerca de 90% do fósforo aplicado pode reagir na primeira hora de contato por meio das reações químicas de adsorção e ou precipitação.

Os solos da região Nordeste do Brasil, especialmente da região semiárida, apresentam características químicas, físicas e mineralógicas diferentes daqueles observados em outras regiões do país. Segundo Salcedo (2006), os solos predominantes nessa região são em geral, pouco desenvolvidos, apresentam elevados teores de fósforo ligado a cálcio, forma de P que teoricamente não é disponível para as plantas. Esses solos apresentam reação neutra e com elevada saturação por bases, ocasionando a precipitação e dissolução de fosfatos de cálcio.

Os solos do semiárido brasileiro ainda não foram muito bem estudados quanto a disponibilidade de fósforo. Neste sentido, a realização de pesquisas sobre a disponibilidade de P com o tempo de contato em solos do semiárido, especialmente naqueles mais alcalinos e ricos em cálcio, se justifica para que se tenha um melhor entendimento de sua dinâmica nesses solos.

A escolha dos solos desta região teve como base a importância econômica destes solos para a agricultura. Nesse ambiente sob caatinga, a região compreendida entre os vales dos rios Piranhas Açu, no Rio Grande do Norte, e o Rio Jaguaribe, no Ceará, se destaca na prática da agricultura de sequeiro e da agricultura irrigada. Neste cenário, se destacam o Tabuleiro de Russas (CE), o vale do rio Piranhas-Açu (RN) e, principalmente, a Chapada do Apodi (CE e RN), pela qualidade desses solos e pela oferta de água para a irrigação.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho, avaliar o efeito do tempo de contato de doses de P aplicadas em quatro solos alcalinos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Piranhas-Açu (RN) e Jaguaribe (CE) e analisar a disponibilidade desse nutriente para as plantas de milho.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este experimento foi desenvolvido com quatro solos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Piranhas-Açu (RN) e Jaguaribe (CE) (Figura 1), sendo esses solos: CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); PVA2 = Argissolo Vermelho-Amarelo (Apodi-RN) e VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN). Os materiais de origem mais comuns dos solos dessas áreas são de natureza sedimentar, compostos principalmente por calcário, arenito, sedimentos do grupo barreiras e sedimentos aluviais (DNPM, 1998).

Foram coletadas amostras de quatro solos na camada de 0-30 cm. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) e posteriormente levadas para o Laboratório de Fertilidade do Solo da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), para a caracterização química e física de acordo com Teixeira et al. (2017) (Tabela 1). As análises de fósforo remanescente (P-rem) foram feitas de acordo com Alvarez V. et al. (2000), em seguida realizou-se a dosagem do P no extrato por espectrofotometria de absorção molecular (Braga & Defelipo, 1974).

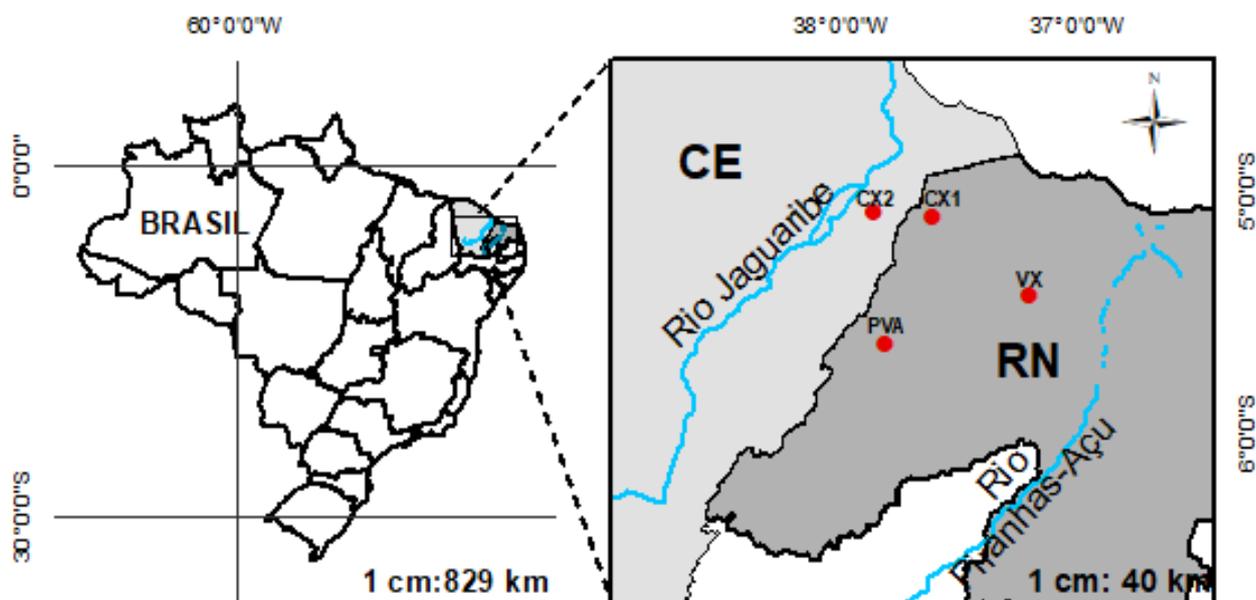


Figura 01. Distribuição espacial dos locais de coleta de solos da região semiárida localizada entre os vales dos rios Piranhas-Açu (RN) e Jaguaribe (CE).

O experimento foi realizado em casa de vegetação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), onde amostras de $3,3 \text{ dm}^3$ dos solos estudados receberam doses de P (0, 100, 200 e 300 mg dm^{-3}) na forma de KH_2PO_4 e foram incubadas por diferentes períodos de tempo (0, 15, 30, 60, 160, 260 e 360 dias), adicionando-se um volume de água deionizada correspondente a 50% da porosidade total de cada solo.

A aplicação das doses de P e a imediata incubação dos solos foram realizadas em sete épocas diferentes, de maneira que em um só dia foram completados os sete tempos de contato do P com o solo. Após o período de incubação os solos foram secos ao ar, destorroados, passados em peneira de 4 mm de malha e devolvidos aos vasos. Subamostras de $0,3 \text{ dm}^3$ de solo de cada vaso foram retiradas passados na peneira de 2 mm e levadas para o Laboratório de Fertilidade do Solo da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) para determinação dos teores de P disponíveis pelo extrator Mehlich-1, seguindo a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017).

O experimento foi realizado em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial (4 solos \times 7 tempos de incubação \times 4 doses) com 112 tratamentos e três repetições, totalizando 336 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída de um vaso de polietileno sem dreno, com 3 dm^3 de solo e duas plantas de milho. Antes do plantio, os solos foram fertilizados com macro e micronutrientes: Cada vaso (3 dm^3) foi adubado com 50 mg dm^{-3} de N ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), 80 mg dm^{-3} de S ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de B (H_3BO_3), $1,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), 5 mg dm^{-3} de Fe ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dissolvido em solução diluída de EDTA), 4 mg dm^{-3} de Mn ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), 4 mg dm^{-3}

Tabela 1 – Características físicas e químicas de quatro solos do semiárido brasileiro⁽¹⁾

Característica	Solo ⁽²⁾			
	CX1	CX2	PVA	VX
Areia (g kg ⁻¹)	660	380	520	290
Silte (g kg ⁻¹)	70	220	90	320
Argila (g kg ⁻¹)	270	400	390	390
Densidade do solo (kg dm ⁻³)	1,420	1,369	1,375	1,279
CMSP ⁽³⁾ (mg g ⁻¹)	0,436	0,884	0,454	0,774
P-rem ⁽⁴⁾ (mg L ⁻¹)	33,0	11,6	25,9	18,1
Fe ₂ O ₃ ⁽⁵⁾ (g kg ⁻¹)	47,07	121,39	44,12	50,03
Fe cristalino ⁽⁶⁾ (g kg ⁻¹)	17,57	40,46	23,42	7,21
Fe amorfo ⁽⁷⁾ (g kg ⁻¹)	0,47	1,81	1,22	1,68
pH	6,6	6,7	7,5	8,0
Mat. Org. (g kg ⁻¹)	9,4	11,0	5,5	7,0
P-Mehlich-1 (mg dm ⁻³)	4,5	4,8	3,7	1,6
K ⁺ (mg dm ⁻³)	144,8	149,5	233,9	64,0
Na ⁺ (mg dm ⁻³)	54,0	116,3	40,0	76,2
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	6,04	11,50	9,33	35,73
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,17	1,29	3,03	5,60
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,00	0,00	0,00
(H+Al) (cmol _c dm ⁻³)	1,58	1,97	0,13	0,00
SB (cmol _c dm ⁻³)	7,81	13,68	13,13	41,83
t (cmol _c dm ⁻³)	7,81	13,68	13,13	41,83
CTC (cmol _c dm ⁻³)	9,39	15,65	13,26	41,83
V (%)	83	87	99	100
m (%)	0	0	0	0
PST(%)	3	3	1	1

⁽¹⁾Análises químicas e físicas realizadas de acordo com Teixeira et al. (2017). ⁽²⁾CX1 = Cambissolo Háplico (Baraúna-RN); CX2 = Cambissolo Háplico (Quixeré-CE); PVA = Argissolo Vermelho-Amarelo (Apodi-RN); VX = Vertissolo Háplico (Mossoró-RN). ⁽³⁾Capacidade máxima de sorção de P no solo. ⁽⁴⁾P-rem = fósforo remanescente (Alvarez V. et al., 2000). ⁽⁵⁾Ferro extraído com ataque sulfúrico da TFSA. ⁽⁶⁾Diferença entre o ferro extraído com Ditionito-citrato-bicarbonato e o ferro amorfo extraído com oxalato de amônio. ⁽⁷⁾Ferro amorfo extraído com oxalato de amônio.

de Zn ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) e $0,15 \text{ mg dm}^{-3}$ de Mo ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Em cobertura, foram realizadas três aplicações de 50 mg dm^{-3} de N sendo utilizado a ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$). Em relação ao K, aplicou-se uma dose de KCl de modo a compensar o K aplicado na maior dose de P.

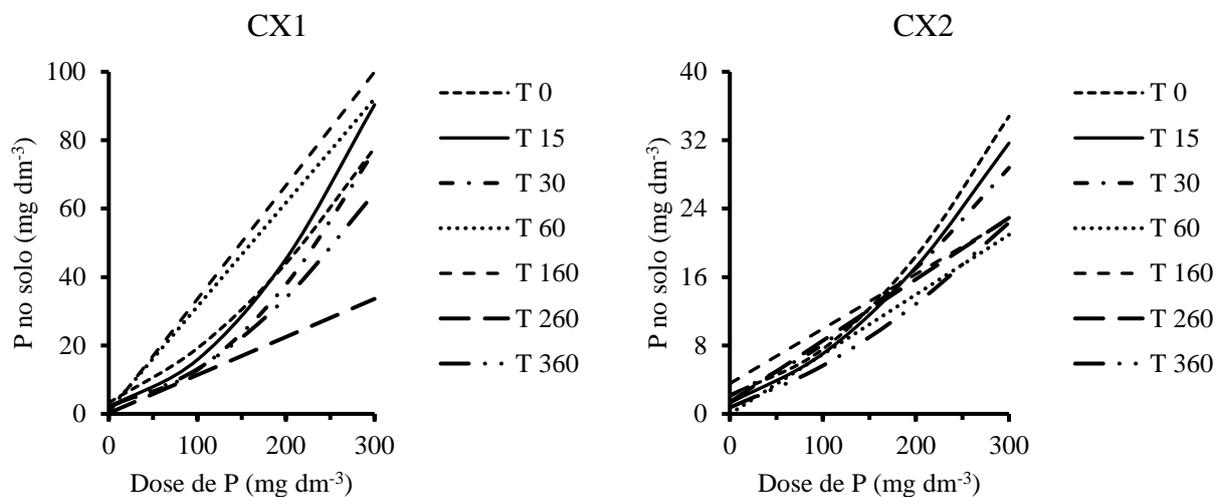
Durante o período de cultivo a umidade dos vasos foi mantida pela reposição da água através de pesagens. A coleta foi realizada trinta dias após a semeadura, cortando-se a parte aérea das plantas de cada vaso a $1,0 \text{ cm}$ do solo. O material colhido foi seco a temperatura de 65°C em estufa de circulação forçada de ar até peso constante e depois pesado para determinação de massa de matéria seca. A matéria seca foi triturada em moinho tipo Wiley e mineralizada por digestão sulfúrica (Tedesco et al., 1995) e o P foi quantificado nos extratos por colorimetria (Braga e Defelipo, 1974). A análise estatística consistiu de análise de variância e regressão para avaliar o efeito de doses de P e do tempo de incubação no teor de P recuperado pelo extrator no solo, no conteúdo de P na planta e na matéria seca.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

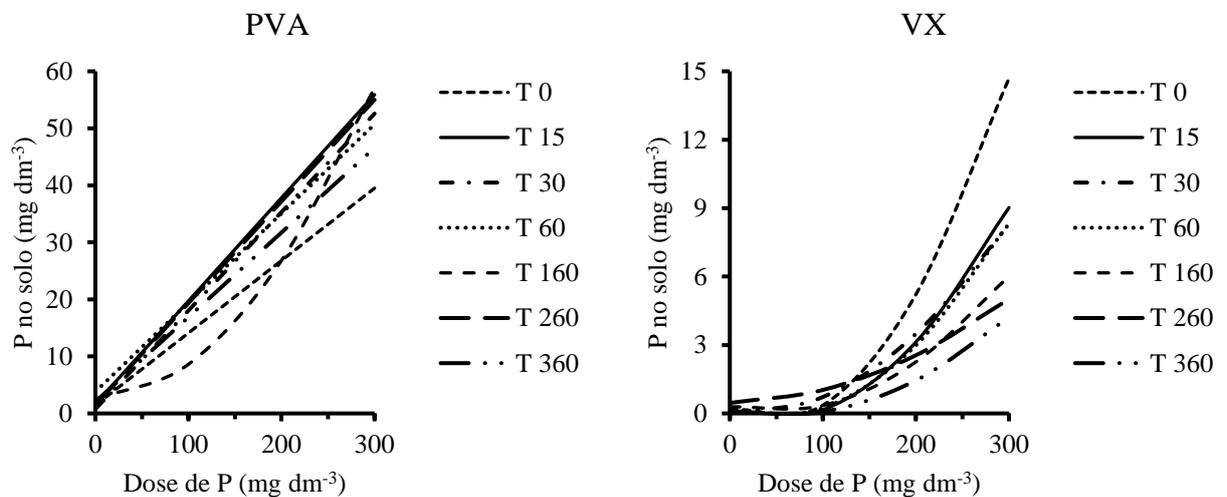
Nos quatro solos estudados, e nos sete tempos de contato das doses de P com esses solos, as análises de variância revelaram efeito significativo das doses de P aplicadas nos teores de P no solo, de P na planta e na produção de matéria seca de milho. Em todos os solos e para todas as três variáveis analisadas, o efeito do tempo de contato não foi significativo na dose zero de P, fato também observado por Broggi et al. (2010) e Santos et al. (2016). Nas demais doses de P aplicadas nos quatro solos estudados, quando houve efeito do tempo de contato do P com o solo nos valores das variáveis analisadas, esse efeito foi de pequena magnitude e na maioria das vezes não foi possível ajustar um modelo de regressão aos dados observados.

Foram ajustadas equações de regressão para os teores de P no solo, na planta e para a produção de matéria seca em função das doses de P aplicadas aos solos CX1, CX2, PVA e VX e do tempo de contato dessas doses de P com esses solos. Todas as equações de regressão possuem valores elevados de R^2 e parâmetros significativos, revelando que os valores estimados por essas equações são muito próximos dos valores observados.

Em todos os solos estudados, os teores de P no solo extraídos com o extrator Mehlich-1 aumentaram com o aumento das doses de P, ajustando-se o modelo quadrático com ponto de mínimo para a maioria dos casos (Figura 2). Isso revela que o incremento de P no solo só passa a ser mais significativo nas maiores doses de P aplicadas, principalmente nos solos CX1 e PVA, os quais apresentam menores valores de CMSP (Tabela 1). Nos solos CX2 e VX, que possuem maiores valores de CMSP (Tabela 1), os teores de P no solo variam pouco com o aumento das doses de P aplicadas (Figura 2). Bonfim et al. (2004) e Paiva et al. (2012) mostraram que em solo com maior CMSP e alto

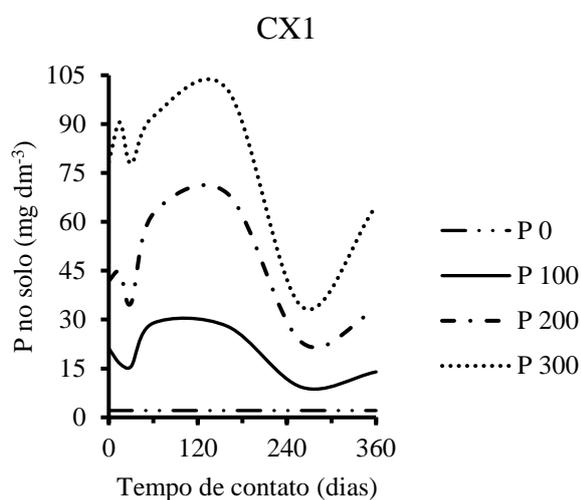


T 0: $Y = 3,26 + 0,114415 * X + 0,000446 ** X^2$	$R^2 = 0,997$	T 0: $Y = 2,18 + 0,026473^{ns} X + 0,000274 ** X^2$	$R^2 = 0,997$
T 15: $Y = 2,00 + 0,060018^{ns} X + 0,000782 ** X^2$	$R^2 = 0,999$	T 15: $Y = 1,27 + 0,035898 * X + 0,000218 ** X^2$	$R^2 = 0,999$
T 30: $Y = 2,08 + 0,036760^{ns} X + 0,000709 ** X^2$	$R^2 = 0,995$	T 30: $Y = 2,08 + 0,046125 ** X + 0,000143 ** X^2$	$R^2 = 0,999$
T 60: $Y = 0,99 + 0,303707 ** X$	$R^2 = 0,998$	T 60: $Y = -0,02 + 0,069847 ** X$	$R^2 = 0,967$
T 160: $Y = 0,36 + 0,331983 ** X$	$R^2 = 0,992$	T 160: $Y = 3,54 + 0,063980 ** X$	$R^2 = 0,889$
T 260: $Y = 0,23 + 0,111243 ** X$	$R^2 = 0,990$	T 260: $Y = 1,38 + 0,071807 ** X$	$R^2 = 0,998$
T 360: $Y = 2,09 + 0,060853^{ns} X + 0,000492 ** X^2$	$R^2 = 0,999$	T 360: $Y = 0,74 + 0,037468 ** X + 0,000115 ** X^2$	$R^2 = 0,997$

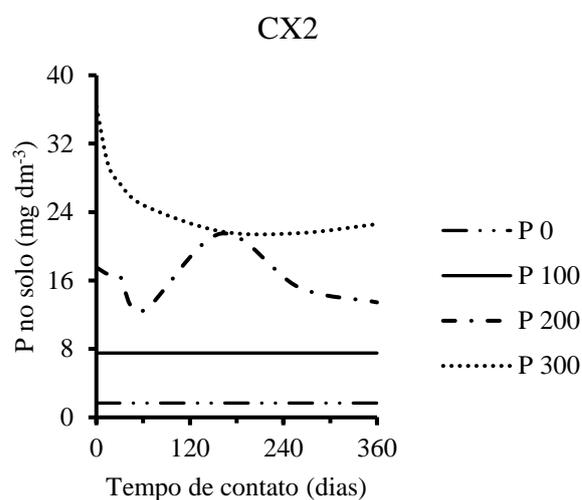


T 0: $Y = 1,42 + 0,126953 ** X$	$R^2 = 0,971$	T 0: $Y = 0,12 - 0,020612 ** X + 0,000231 ** X^2$	$R^2 = 0,998$
T 15: $Y = 1,63 + 0,180907 ** X$	$R^2 = 0,997$	T 15: $Y = 0,11 - 0,014150 ** X + 0,000146 ** X^2$	$R^2 = 0,995$
T 30: $Y = 0,77 + 0,172690 ** X$	$R^2 = 0,906$	T 30: $Y = -0,04 - 0,002495 ** X + 0,000101 ** X^2$	$R^2 = 0,999$
T 60: $Y = 3,81 + 0,156280 ** X$	$R^2 = 0,961$	T 60: $Y = 0,07 - 0,011243 ** X + 0,000129 ** X^2$	$R^2 = 0,998$
T 160: $Y = 2,50 + 0,000850^{ns} X + 0,000604 ** X^2$	$R^2 = 0,997$	T 160: $Y = 0,29 - 0,008563 ** X + 0,000092 ** X^2$	$R^2 = 0,994$
T 260: $Y = 1,52 + 0,178287 ** X$	$R^2 = 0,974$	T 260: $Y = 0,46 + 0,000995^{ns} X + 0,000047 ** X^2$	$R^2 = 0,998$
T 360: $Y = 2,04 + 0,148437 ** X$	$R^2 = 0,990$	T 360: $Y = 0,07 - 0,006922^{ns} X + 0,000069 ** X^2$	$R^2 = 0,992$

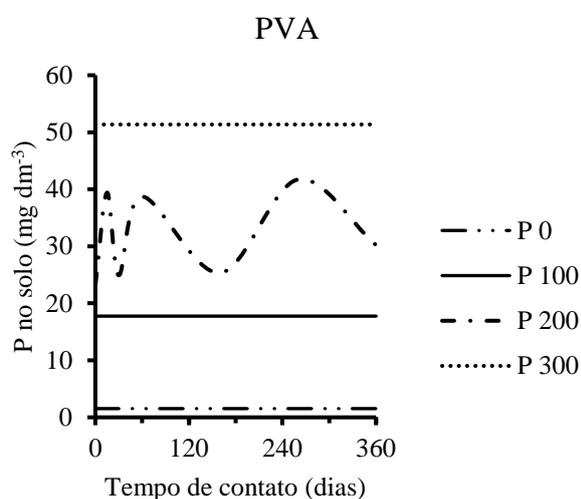
Figura 2 – Curvas e retas ajustadas com os valores estimados pelas equações de regressão que estimam os teores de P no solo em função de doses de P aplicadas, avaliados em diferentes tempos de contato do P com os solos CX1, CX2, PVA e VX.



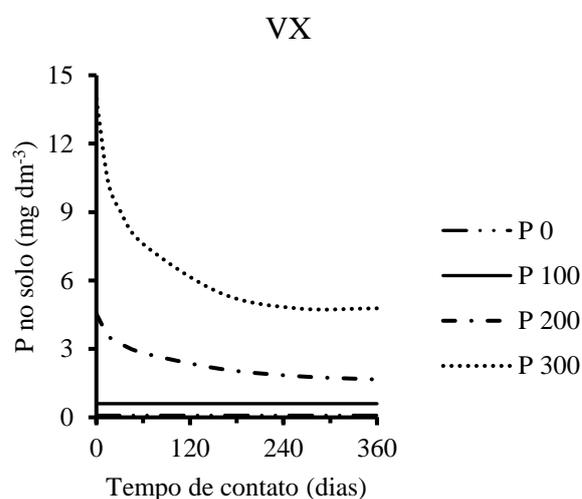
P 0: $Y = \bar{Y} = 2,09$
 P 100: Nenhum modelo se ajustou aos dados
 P 200: Nenhum modelo se ajustou aos dados
 P 300: Nenhum modelo se ajustou aos dados



P 0: $Y = \bar{Y} = 1,67$
 P 100: $Y = \bar{Y} = 7,52$
 P 200: $Y =$ Nenhum modelo se ajustou aos dados
 P 300: $Y = 36,34 - 2,013330^{**}X^{0,5} + 0,06793^{**}X \quad R^2 = 0,893$

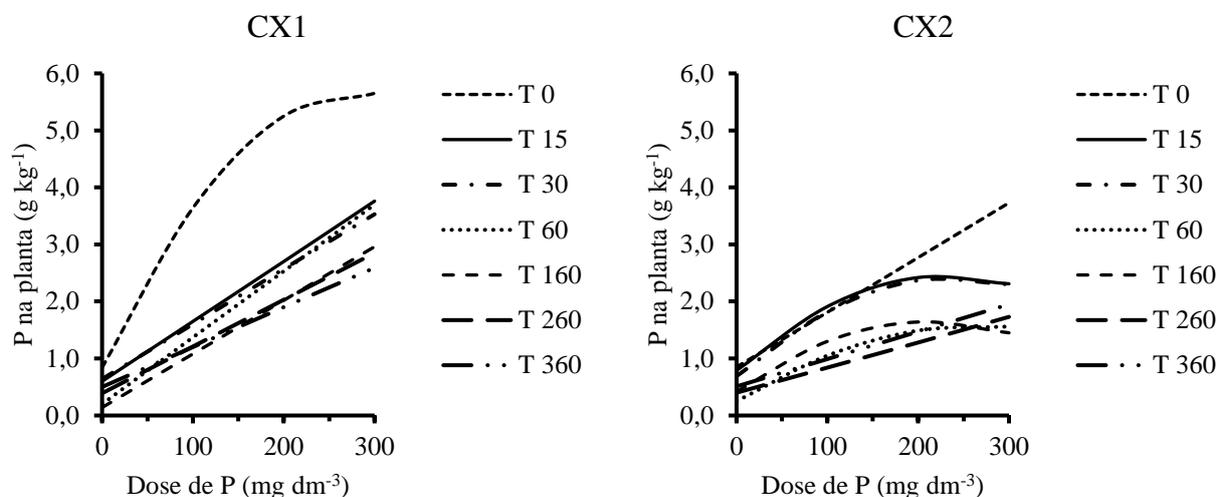


P 0: $Y = \bar{Y} = 1,53$
 P 100: $Y = \bar{Y} = 17,75$
 P 200: $Y =$ Nenhum modelo se ajustou aos dados
 P 300: $Y = \bar{Y} = 51,36$

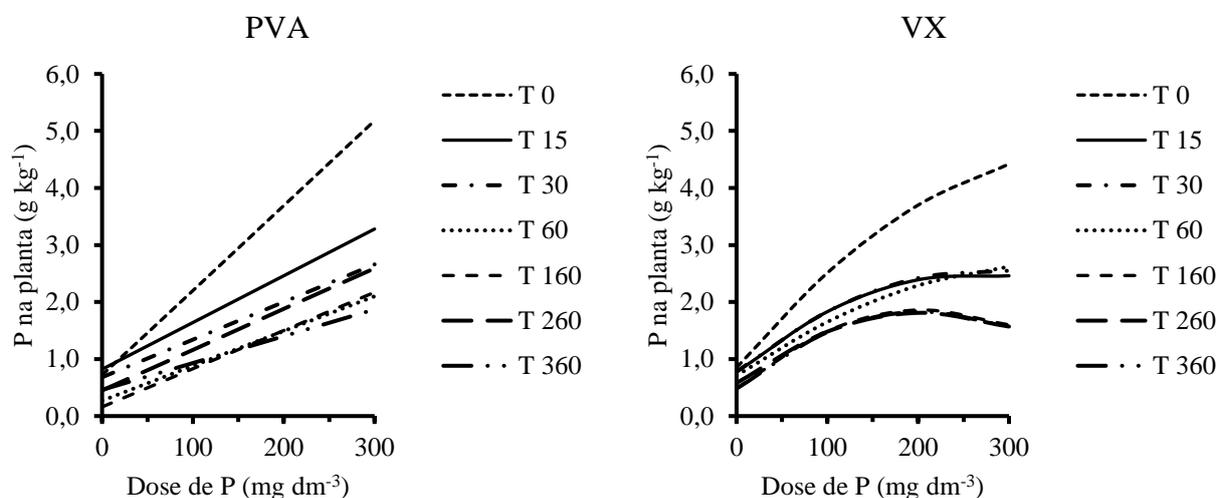


P 0: $Y = \bar{Y} = 0,09$
 P 100: $Y = \bar{Y} = 0,60$
 P 200: $Y = 4,54 - 0,271126^{**}X^{0,5} + 0,006274^{ns}X \quad R^2 = 0,819$
 P 300: $Y = 13,96 - 1,054290^{**}X^{0,5} + 0,030039^{**}X \quad R^2 = 0,943$

Figura 3 – Curvas e retas ajustadas com os valores estimados pelas equações de regressão que estimam o teor de P no solo em função do tempo de contato de doses de P aplicadas nos solos CX1, CX2, PVA e VX. (OBS.: Nos cinco casos em que nenhum modelo de regressão se ajustou aos dados, utilizou-se os dados observados para traçar as linhas nos gráficos).

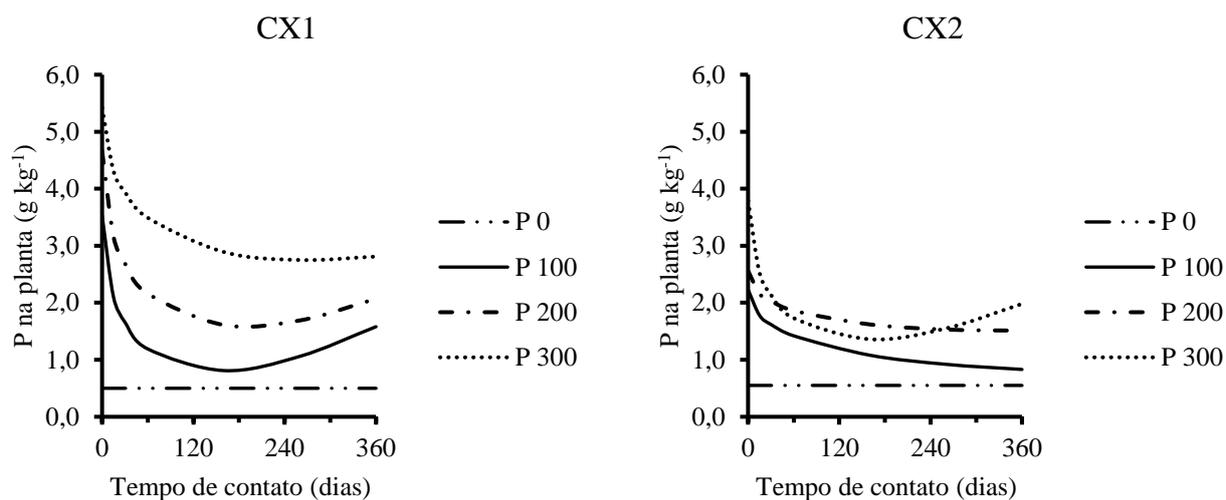


T 0: $Y = 0,84 + 0,033990^{**}X - 0,000060^{**}X^2$	$R^2 = 0,995$	T 0: $Y = 0,85 + 0,009613^{**}X$	$R^2 = 0,954$
T 15: $Y = 0,60 + 0,010517^{**}X$	$R^2 = 0,952$	T 15: $Y = 0,79 + 0,014287^{**}X - 0,000031^{**}X^2$	$R^2 = 0,991$
T 30: $Y = 0,64 + 0,009650^{**}X$	$R^2 = 0,978$	T 30: $Y = 0,69 + 0,014367^{**}X - 0,000030^{**}X^2$	$R^2 = 0,960$
T 60: $Y = 0,20 + 0,011650^{**}X$	$R^2 = 0,998$	T 60: $Y = 0,25 + 0,009815^{**}X - 0,000018^{**}X^2$	$R^2 = 0,910$
T 160: $Y = 0,14 + 0,009417^{**}X$	$R^2 = 0,962$	T 160: $Y = 0,42 + 0,011498^{**}X - 0,000027^{**}X^2$	$R^2 = 0,992$
T 260: $Y = 0,39 + 0,008190^{**}X$	$R^2 = 0,997$	T 260: $Y = 0,40 + 0,004437^{**}X$	$R^2 = 0,993$
T 360: $Y = 0,50 + 0,006983^{**}X$	$R^2 = 0,989$	T 360: $Y = 0,51 + 0,004800^{**}X$	$R^2 = 0,924$



T 0: $Y = 0,72 + 0,014873^{**}X$	$R^2 = 0,991$	T 0: $Y = 0,85 + 0,018908^{**}X - 0,000023^{**}X^2$	$R^2 = 0,999$
T 15: $Y = 0,82 + 0,008200^{**}X$	$R^2 = 0,970$	T 15: $Y = 0,77 + 0,013035^{**}X - 0,000025^{**}X^2$	$R^2 = 0,958$
T 30: $Y = 0,68 + 0,006600^{**}X$	$R^2 = 0,934$	T 30: $Y = 0,78 + 0,012827^{**}X - 0,000023^{**}X^2$	$R^2 = 0,920$
T 60: $Y = 0,27 + 0,006093^{**}X$	$R^2 = 0,990$	T 60: $Y = 0,71 + 0,010922^{**}X - 0,000015^{**}X^2$	$R^2 = 0,921$
T 160: $Y = 0,16 + 0,006700^{**}X$	$R^2 = 0,991$	T 160: $Y = 0,49 + 0,013142^{**}X - 0,000031^{**}X^2$	$R^2 = 0,973$
T 260: $Y = 0,45 + 0,007130^{**}X$	$R^2 = 0,947$	T 260: $Y = 0,58 + 0,011793^{**}X - 0,000028^{**}X^2$	$R^2 = 0,913$
T 360: $Y = 0,46 + 0,004710^{**}X$	$R^2 = 0,995$	T 360: $Y = 0,48 + 0,013042^{**}X - 0,000031^{**}X^2$	$R^2 = 0,980$

Figura 4 – Curvas e retas ajustadas com os valores estimados pelas equações de regressão que estimam os teores de P na planta em função de doses de P aplicadas, avaliados em diferentes tempos de contato do P com os solos CX1, CX2, PVA e VX.



P 0: $Y = \bar{Y} = 0,50$

P 100: $Y = 3,53 - 0,439975^{**}X^{0,5} + 0,017763^{**}X$ $R^2 = 0,911$

P 200: $Y = 4,66 - 0,450724^{**}X^{0,5} + 0,016547^{**}X$ $R^2 = 0,846$

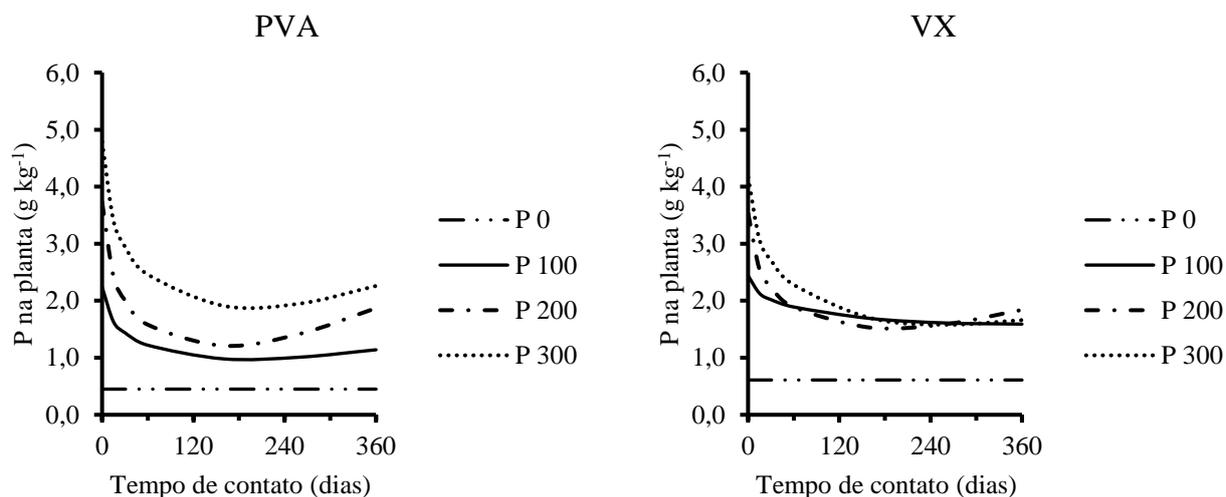
P 300: $Y = 5,42 - 0,325585^{**}X^{0,5} + 0,009919^{**}X$ $R^2 = 0,907$

P 0: $Y = \bar{Y} = 0,55$

P 100: $Y = 2,23 - 0,125028^{**}X^{0,5} + 0,002722^{**}X$ $R^2 = 0,719$

P 200: $Y = 2,56 - 0,113920^{**}X^{0,5} + 0,003117^{**}X$ $R^2 = 0,784$

P 300: $Y = 3,79 - 0,384836^{**}X^{0,5} + 0,015249^{**}X$ $R^2 = 0,948$



P 0: $Y = \bar{Y} = 0,45$

P 100: $Y = 2,24 - 0,181358^{**}X^{0,5} + 0,006514^{**}X$ $R^2 = 0,758$

P 200: $Y = 3,73 - 0,400449^{**}X^{0,5} + 0,015946^{**}X$ $R^2 = 0,829$

P 300: $Y = 4,79 - 0,416827^{**}X^{0,5} + 0,014951^{**}X$ $R^2 = 0,904$

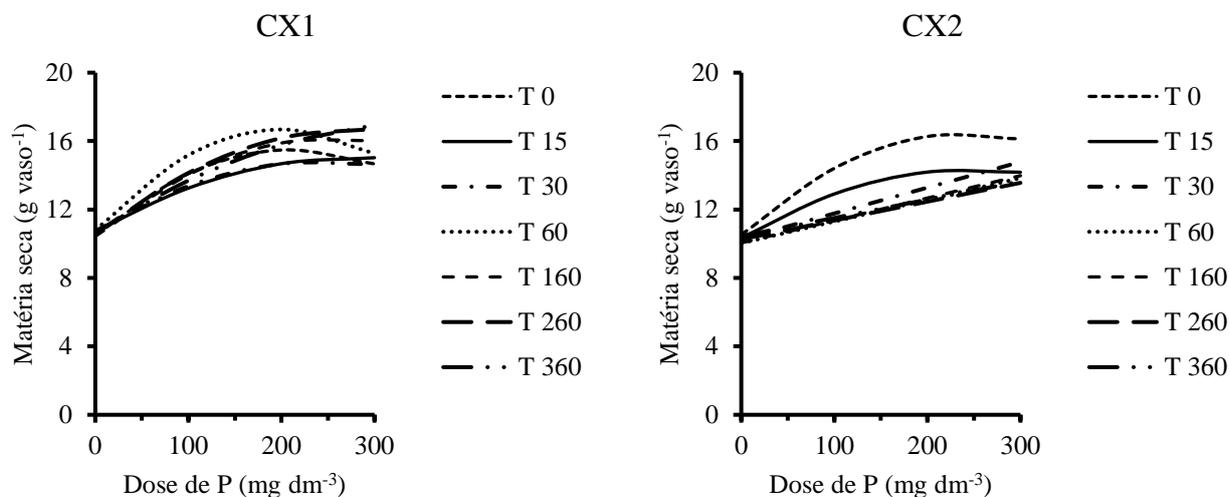
P 0: $Y = \bar{Y} = 0,61$

P 100: $Y = 2,44 - 0,089903^{**}X^{0,5} + 0,002366^{ns}X$ $R^2 = 0,947$

P 200: $Y = 3,54 - 0,297947^{**}X^{0,5} + 0,010992^{**}X$ $R^2 = 0,924$

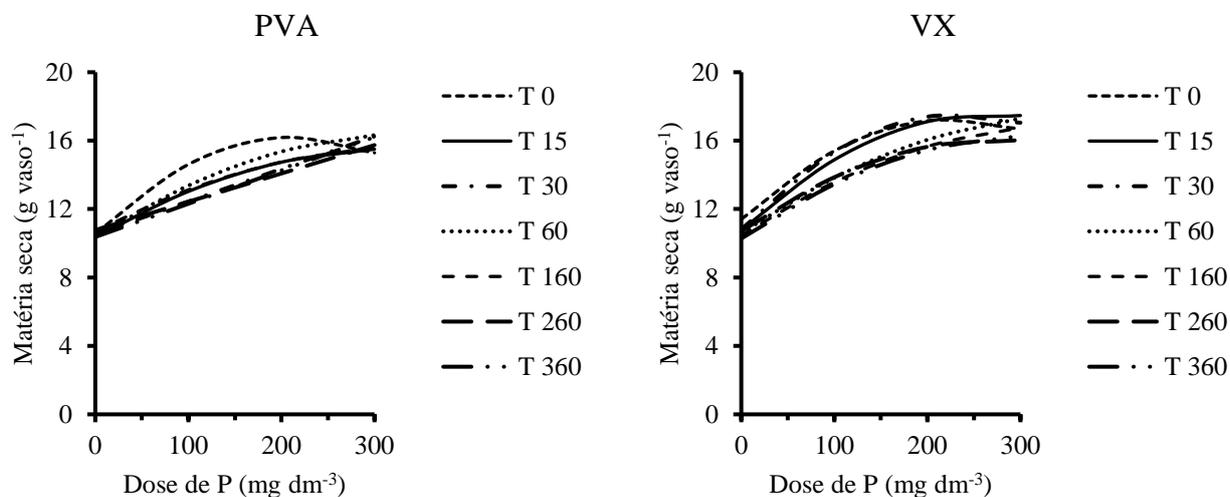
P 300: $Y = 4,17 - 0,322732^{**}X^{0,5} + 0,010036^{**}X$ $R^2 = 0,904$

Figura 5 – Curvas e retas ajustadas com os valores estimados pelas equações de regressão que estimam o teor de P na planta em função do tempo de contato de doses de P aplicadas nos solos CX1, CX2, PVA e VX.



T 0:	$Y = 10,5 + 0,046855^{**}X - 0,000110^{**}X^2$	$R^2 = 0,998$
T 15:	$Y = 10,8 + 0,030388^{**}X - 0,000054^{**}X^2$	$R^2 = 0,994$
T 30:	$Y = 10,7 + 0,032823^{**}X - 0,000066^{**}X^2$	$R^2 = 0,955$
T 60:	$Y = 10,8 + 0,058132^{**}X - 0,000144^{**}X^2$	$R^2 = 0,991$
T 160:	$Y = 10,4 + 0,044425^{**}X - 0,000086^{**}X^2$	$R^2 = 0,998$
T 260:	$Y = 10,6 + 0,043013^{**}X - 0,000075^{**}X^2$	$R^2 = 0,999$
T 360:	$Y = 10,7 + 0,034785^{**}X - 0,000046^{**}X^2$	$R^2 = 0,995$

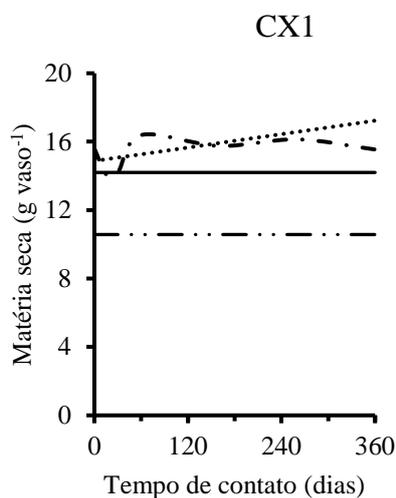
T 0:	$Y = 10,5 + 0,048832^{**}X - 0,000101^{**}X^2$	$R^2 = 0,999$
T 15:	$Y = 10,3 + 0,032198^{**}X - 0,000065^{**}X^2$	$R^2 = 0,951$
T 30:	$Y = 10,3 + 0,015050^{**}X$	$R^2 = 0,997$
T 60:	$Y = 10,0 + 0,012690^{**}X$	$R^2 = 0,967$
T 160:	$Y = 10,0 + 0,013107^{**}X$	$R^2 = 0,961$
T 260:	$Y = 10,3 + 0,010987^{**}X$	$R^2 = 0,974$
T 360:	$Y = 10,4 + 0,010613^{**}X$	$R^2 = 0,979$



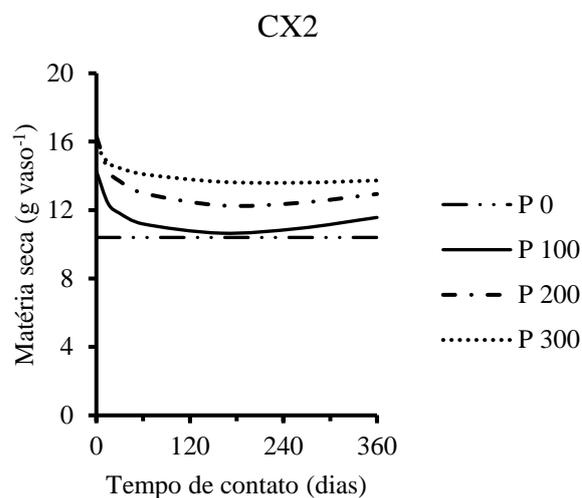
T 0:	$Y = 10,6 + 0,052567^{**}X - 0,000123^{**}X^2$	$R^2 = 0,999$
T 15:	$Y = 10,4 + 0,031308^{**}X - 0,000047^{**}X^2$	$R^2 = 0,998$
T 30:	$Y = 10,5 + 0,019047^{**}X$	$R^2 = 0,937$
T 60:	$Y = 10,4 + 0,035197^{**}X - 0,000051^{**}X^2$	$R^2 = 0,984$
T 160:	$Y = 10,7 + 0,027895^{**}X - 0,000039^{**}X^2$	$R^2 = 0,993$
T 260:	$Y = 10,8 + 0,016557^{**}X$	$R^2 = 0,983$
T 360:	$Y = 10,4 + 0,019470^{**}X$	$R^2 = 0,975$

T 0:	$Y = 11,4 + 0,051002^{**}X - 0,000111^{**}X^2$	$R^2 = 0,902$
T 15:	$Y = 10,8 + 0,050210^{**}X - 0,000093^{**}X^2$	$R^2 = 0,983$
T 30:	$Y = 10,8 + 0,057098^{**}X - 0,000121^{**}X^2$	$R^2 = 0,989$
T 60:	$Y = 10,6 + 0,037030^{**}X - 0,000049^{**}X^2$	$R^2 = 0,994$
T 160:	$Y = 10,5 + 0,035820^{**}X - 0,000050^{**}X^2$	$R^2 = 0,996$
T 260:	$Y = 10,7 + 0,038363^{**}X - 0,000069^{**}X^2$	$R^2 = 0,999$
T 360:	$Y = 10,3 + 0,037558^{**}X - 0,000059^{**}X^2$	$R^2 = 0,982$

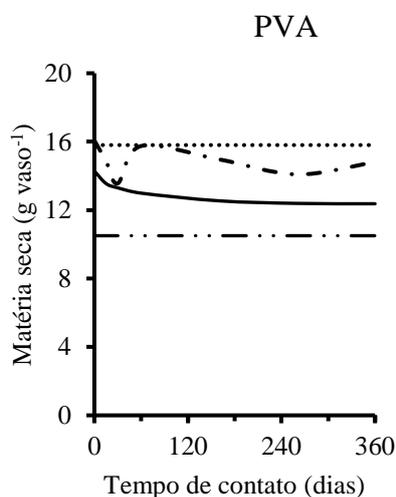
Figura 6 – Curvas e retas ajustadas com os valores estimados pelas equações de regressão que estimam a produção de matéria seca da parte aérea da planta em função de doses de P aplicadas, avaliada em diferentes tempos de contato do P com os solos CX1, CX2, PVA e VX.



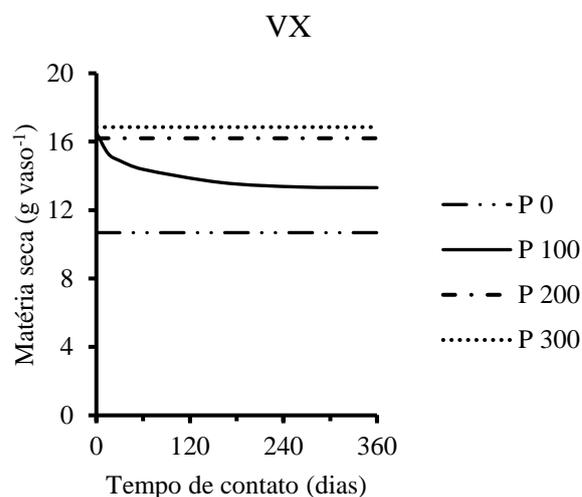
P 0: $Y = \bar{Y} = 10,57$
 P 100: $Y = \bar{Y} = 14,20$
 P 200: Nenhum modelo se ajustou aos dados
 P 300: $Y = 14,9 + 0,006540 * X$ $R^2 = 0,941$



P 0: Nenhum modelo se ajustou aos dados
 P 100: $Y = 14,3 - 0,574620 * X^{0,5} + 0,022756 * X$ $R^2 = 0,966$
 P 200: $Y = 16,3 - 0,605885 * X^{0,5} + 0,022503 * X$ $R^2 = 0,979$
 P 300: $Y = 15,7 - 0,283887 * X^{0,5} + 0,009395 * X$ $R^2 = 0,734$



P 0: $Y = \bar{Y} = 10,50$
 P 100: $Y = 14,3 - 0,212918 * X^{0,5} + 0,005913 * X$ $R^2 = 0,728$
 P 200: Nenhum modelo se ajustou aos dados
 P 300: $Y = \bar{Y} = 15,80$



P 0: $Y = \bar{Y} = 10,7$
 P 100: $Y = 16,5 - 0,353335 * X^{0,5} + 0,009667 * X$ $R^2 = 0,822$
 P 200: $Y = \bar{Y} = 16,2$
 P 300: $Y = \bar{Y} = 16,9$

Figura 7 – Curvas e retas ajustadas com os valores estimados pelas equações de regressão que estimam a produção de matéria seca da parte aérea da planta em função do tempo de contato de doses de P aplicadas nos solos CX1, CX2, PVA e VX. (OBS.: Nos dois casos em que nenhum modelo de regressão se ajustou aos dados, utilizou-se os dados observados para traçar as linhas nos gráficos).

FCP a sorção de P com o tempo de incubação é maior, o que requer doses mais elevadas para manter uma concentração de P em solução capaz de, pelo menos, não permitir redução na produção de matéria seca.

Os teores de P no solo estimados pelas equações de regressão variaram de 0,2 a 100,0 mg dm⁻³ no solo CX1, de 0,0 a 34,8 mg dm⁻³ no solo CX2, 0,8 a 57,1 no solo PVA e de 0,0 a 14,7 no solo VX (Figura 2). A magnitude desses valores está em consonância com as estimativas da CMSP dos solos estudados (Tabela 1), pois a recuperação de P do solo pelo extrator Mehlich-1 foi maior nos solos de menor CMSP (CX1 e PVA), e menor nos solos de maior CMSP (CX2 e VX). Além disso, o pH elevado do solo VX (pH= 8,0), certamente contribuiu para um maior desgaste da acidez do extrator Mehlich-1, o que favoreceu mais ainda a obtenção de valores muito baixos de P no solo (Figura 2). Para o Mehlich-1 são verificados valores subestimados do P-disponível em solos argilosos principalmente nos alcalinos em razão do poder de extração do mesmo ser desgastado pelo próprio solo. Nesses solos o pH inicial de 1,2 do Mehlich-1 é rapidamente elevado para valores de pH próximos ao do solo. Ao mesmo tempo, o SO₄²⁻ do extrator, que atua por troca com o fosfato adsorvido, é também, rapidamente adsorvido pelo solo em sítios ainda não ocupados pelo P, perdendo o poder de extração (Novais & Smyth 1999; Novais et al., 2007; Freitas et al., 2013).

Em relação ao efeito do tempo de contato das doses de P aplicadas nos teores de P no solo extraídos pelo extrator Mehlich-1, observa-se que este não foi significativo em grande parte dos casos e em outras situações não foi possível se ajustar nenhum modelo de regressão aos dados (Figura 3). Apenas para a dose 300 mg dm⁻³ de P aplicada no solo CX2, e para as doses 200 e 300 mg dm⁻³ aplicadas no solo VX, aconteceu uma diminuição muito pequena dos teores de P no solo em função do aumento do tempo de contato do P com esses solos, entre 30 e 60 dias após a aplicação das doses de P (Figura 3). Nesses três casos em particular, após 60 dias de incubação das doses de P aplicadas, os teores de P no solo praticamente não variaram mais com o aumento do tempo de contato do P com os solos (Figura 3). Assim, constata-se que o aumento do tempo de contato do P com o solo praticamente não influenciou os teores de P no solo.

Nos solos CX1, CX2 e PVA, as variações para mais e para menos observadas nos teores de P no solo em função do tempo de contato do P com os mesmos, são decorrentes das variações na sorção e dessorção de P nesses solos, as quais provavelmente foram influenciadas pelos mecanismos de mineralização e de humificação da matéria orgânica desses solos e pelos ciclos de umedecimento e secagem que ocorreram ao longo dos 360 dias de incubação do P com os solos. Beckett & White (1964) relatam que a desagregação das partículas causadas pelos processos de expansão e contração do solo aumenta a afinidade para o P pela exposição de novos sítios de adsorção podendo causar um acréscimo ou um decréscimo no P disponível no solo. Porém, isso não significa que essa mesma

tendência seja obrigatoriamente verificada para os teores de P na planta e para a produção de matéria seca.

Os teores de P na planta aumentaram em função do aumento das doses de P aplicadas em todos os solos estudados, geralmente com ajuste do modelo linear para os solos CX1 e PVA, e modelo quadrático com ponto de máximo para os solos CX2 e VX (Figura 4). Nos solos de menor Fator Capacidade de Fósforo (FCP), os teores estimados de P na parte aérea da planta variaram de 0,14 a 5,65 g kg⁻¹ no solo CX1 e de 0,16 a 5,18 g kg⁻¹ no solo PVA, enquanto nos solos de maior FCP esses valores variaram de 0,25 a 3,73 g kg⁻¹ no solo CX2 e de 0,48 a 4,42 g kg⁻¹ no solo VX (Figura 4).

Comparando os dados de P na planta com os valores dos teores de P no solo, percebe-se que os baixos teores de P nos solos CX2 e VX (Figura 3) não se refletiram em teores de P na planta muito baixos em relação aos solos CX1 e PVA (Figura 4), pois nos solos CX2 e VX a disponibilidade real de P para as plantas foi maior do que aquela prevista pelo extrator Mehlich-1. Segundo Novais & Smyth, (1999) solos com maior capacidade tampão de fosfato mantêm baixos teores de P na solução do solo, mas por outro lado apresentam maior capacidade de reposição do P para a solução do solo, quando este é absorvido pela planta.

Em todos os solos estudados, com exceção da dose zero todas as doses de P aplicadas o teor de P na planta variou com o aumento do tempo de contato das doses de P aplicadas aos solos, ajustando-se um modelo raiz quadrada com ponto de mínimo (Figura 5). Assim, observa-se, que no tempo de contato igual a zero os teores de P na planta são elevados, refletindo uma maior disponibilidade de P na solução do solo logo após a adubação. Com o aumento do tempo de contato, os teores de P na planta diminuem entre os 30 e 60 dias após a incubação, continuam caindo até 120 dias de incubação, mas depois tendem a se estabilizarem nos maiores tempos de contato do P com os solos (Figura 5).

Essa redução da concentração de P na planta com o aumento do tempo de contato do P com o solo reflete a diminuição do teor de P na solução do solo como consequência da sorção de P no solo. Moreira et al. (1991) avaliaram o efeito do tempo de contato do P com o solo sobre sua disponibilidade para mudas de eucalipto e verificaram que a disponibilidade de P para as plantas diminuiu com o aumento do tempo de contato com o solo. Broggi et al. (2014) avaliaram níveis críticos de fósforo em milho cultivado em solos de diferentes mineralogias e constataram que em ambos os solos houve redução nos teores de P nas plantas de milho com o tempo de incubação. Entretanto, Santos et al. (2016) trabalhando com milho em seis solos representativos do Estado da Paraíba, verificaram que o aumento do tempo de contato do P com os solos praticamente não diminuiu a disponibilidade de P para as plantas, provavelmente porque nos solos estudados a transformação de P-lábil em P-não lábil foi inexpressiva.

Em todos os solos estudados, o crescimento da planta avaliado pela produção de matéria seca aumentou com o aumento das doses de P aplicadas (Figura 6), fato confirmado pelo aumento da

disponibilidade de P no solo (Figura 2) e do aumento do teor de P na planta (Figura 4) em virtude da aplicação das doses de P nos solos. Na maioria dos casos ajustou-se o modelo quadrático com ponto de máximo, mas para alguns tempos de contato no solo CX2 (30, 60, 160, 260 e 360 dias), e no solo PVA (30, 260 e 360 dias), o modelo linear foi o que se ajustou melhor aos dados (Figura 6).

Os quatro solos estudados, embora apresentem variações de FCP, conforme se observa pelos valores de CMSP e P-rem (Tabela 1), não apresentaram muitas diferenças entre si quanto à mínima e máxima produção de matéria seca estimadas para a parte aérea das plantas de milho, estas variaram de 10,4 a 16,9 g vaso⁻¹ no solo CX1, 10,0 a 16,3 g vaso⁻¹ no solo CX2, 10,4 a 16,3 g vaso⁻¹ no solo PVA, e no solo VX a produção de matéria seca variou de 10,3 a 17,5 g vaso⁻¹ (Figura 6). Dessa forma, parece que a planta se ajustou aos diferentes valores de FCP dos solos, a fim de garantir produções de matéria seca mínima e máxima semelhantes, independentes do solo. Bedin et al. (2003) trabalhando com diferentes fontes de fósforo e crescimento do milho em solos com diferentes FCP, constataram que nas produções de matéria seca, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos.

Da mesma forma, Bastos et al. (2010), trabalhando com diferentes doses de P na cultura do milho em seis diferentes tipos de solo de Alagoas, não encontraram diferenças na produção de matéria seca nos solos com diferentes FCP. Broggi et al. (2014) avaliaram níveis críticos de fósforo para milho em dois solos com diferentes FCP e constataram que em ambos os solos houve redução nos teores de P nas plantas de milho com o tempo de incubação, justificando-se pelo decréscimo do P disponível em função do tempo, mesmo assim, houve aumento na produção de matéria seca do milho, enfatizando, possivelmente, o maior ajuste metabólico do milho neste solo, refletindo-se numa maior eficiência de utilização de P. Alguns trabalhos têm mostrado grande capacidade de ajuste da planta à utilização do P absorvido em solos com diferentes valores de FCP (Muniz et al., 1985; Novais et al., 1993). Segundo esses autores, a maior ou menor competição com o solo pelo fosfato aplicado faz com que a planta se ajuste para melhor utilizar a quantidade de P que lhe é colocada à disposição, levando aos menores níveis críticos encontrados no caso dos solos mais tamponados.

Das três características avaliadas, a matéria seca é a mais importante e foi a que menos sofreu influência do tempo de contato do P com os solos. Em todos os solos, para a dose zero de P não houve efeito do tempo de contato (Figura 7). Nas demais doses, quando o efeito do tempo de contato foi significativo, este foi de pequena magnitude com ajuste do modelo raiz quadrada com ponto de mínimo (Figura 7).

Considerando a média dos sete tempos de contato, as estimativas das doses de P associadas às produções máximas de matéria seca para os solos CX1, CX2, PVA e VX, foram iguais a 256, 284, 288 e 273 mg dm⁻³, respectivamente. Se fossem aplicadas essas doses de P nos quatro solos estudados,

estima-se que as produções máximas de matéria seca das plantas de milho nos solos CX1, CX2, PVA e VX seriam iguais a 16,0; 14,4; 16,0 e 17,0 g vaso⁻¹, respectivamente.

Portanto, as diferenças de FCP entre os quatro solos estudados também não influenciaram significativamente os valores das doses de P associadas às produções máximas de matéria seca das plantas de milho, e nem influenciaram nos valores das produções máximas de matéria seca das plantas de milho. Farias et al. (2009) cultivaram milho utilizando 12 solos representativos do estado da Paraíba, com diferentes FCP e cinco doses de P, constatou que a produção média de matéria seca variou de 14,83 a 22,73 g vaso⁻¹ nos solos mais desenvolvidos com maiores FCP e de 13,54 a 30,25 g vaso⁻¹ nos solos menos desenvolvidos com menores FCP. Da mesma forma Santos et al. (2016) cultivaram milho em seis solos representativos do Estado da Paraíba, com diferentes FCP e verificaram que o aumento do tempo de contato do P com os solos apresentaram quedas na produção de matéria seca nos solos com menores valores de CMSP e de teor de argila enquanto os que apresentaram incrementos foram os solos que apresentam características contrárias.

4. CONCLUSÕES

Em todos os solos estudados, os teores de P no solo extraídos com o extrator Mehlich-1 aumentaram com o aumento das doses de P, no entanto o aumento do tempo de contato do P com o solo teve pouca influência nos teores de P no solo.

Com o aumento do tempo de contato, os teores de P na planta diminuiu muito entre 30 e 60 dias após a incubação e continuaram diminuindo até 120 dias de incubação, mas depois tenderam a se estabilizarem nos maiores tempos de contato do P com os solos.

Os quatro solos estudados, embora apresentem variações de fator capacidade de fósforo, não apresentaram muitas diferenças entre si quanto às produções de matéria seca estimada mínima e máxima da parte aérea das plantas de milho.

5. LITERATURA CITADA

Alvarez V., V. H.; Novais, R. F.; dias, L. E.; Oliveira, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. Boletim Informativo. SBCS, v. 25, p. 27-32, 2000.

Bastos, A. L.; Costa, J. P. da; Silva, I. F. da; Raposo, R. W. C.; Oliveira, F. A.; Albuquerque, A. W. de. Resposta do milho a doses de fósforo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, p.485-491, 2010.

Beckett, P. H. T.; White, R. E. Studies on phosphate potentials of soils. III. The pool of labile inorganic phosphate. Plant and soil, n. 21, p. 253-282, 1964.

- Bedin, I; Resende, A. V. de; Furtini Neto, A. E.; Mendonça, L. A.; Vilela, L. C. S. Fontes de fósforo e crescimento do milho em solos com diferentes capacidades tampão de fosfato. *Ciência e Agrotecnologia*, Edição Especial, p.1522-1531, 2003.
- Bonfim, E. M. S.; Freire, F. J.; Santos, M. V. F.; Silva, T. J. A.; Freire, M. B. G. S. Níveis críticos de fósforo para Braquiaria brizantha e suas relações com características físicas e químicas em solos de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 323-328, 2004.
- Braga, J. M.; Defelipo, V. B. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. *Revista Ceres*, v. 21, p. 73-85, 1974.
- Broggi, F.; Oliveira, A. C. de; Freire, F. J.; Oliveira, E. C. de; Rocha, A. T. da; Freire, M. B. G. S. Níveis críticos de fósforo em milho cultivado em solos de diferentes mineralogias. *Revista Caatinga*, v. 27, n. 4, p. 164 - 170, 2014.
- Broggi, F.; Oliveira, A. C.; Freire, F. J.; Freire, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A. Adsorption and chemical extraction of phosphorus as a function of soil incubation time. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.1, p.32-38, 2010.
- DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Escala 1:500.000. Natal, DNPM – 4º Distrito/UFRN/Petrobrás/CRM, 1998.
- Farias, D. R.; Oliveira, F. H. T.; Santos, D.; Arruda, J. A.; Hoffmann, R. B.; Novais, R. F. Fósforo em solos representativos do estado da paraíba: II- disponibilidade de fósforo para plantas de milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:633-646, 2009.
- Freitas, I. F.; Novais, R. F.; Villani, E. M. A.; Novais, S. V. Phosphorus extracted by ion exchange resins and Mehlich-1 from Oxisols (Latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. *Brazilian Soil Science*. v. 37, p. 667-77, 2013.
- Gonçalves, J. L. M.; Novais, R. F.; Barros, N. F.; Neves, J. C. L.; Ribeiro, A. C. Cinética de transformação de fósforo lábil em não lábil, em solos do Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.13, p.13-24, 1989.
- Moreira, J. F.; Barros, N. F.; Novais, R. F.; Neves, J. C. L.; Leal, P. G. L. Efeito do tempo de contato do fósforo com o solo sobre sua disponibilidade para mudas de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.15, n.3, p.303-308, 1991.
- Muniz, A. S.; Novais, R. F.; Barros, N. F.; Neves, J. C. L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 9, n. 3, p. 237-243, 1985.
- Novais R. F; Smyth, T. J.; Nunes, F. N. Fósforo. In: Novais R. F.; Alvarez V. V. H.; Barros N. F.; Fontes R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p.471-550.
- Novais, R. F.; Neves, J. C. L.; Barros, N. F.; Casali, V. W. D.; Fabres, A. S. The influence of the soil phosphate capacity factor on soil and plant phosphorus critical levels of different vegetables. In: Fragoso, M. A. C.; Beusichem, M. L. V. (Eds.). Optimization of plant nutrition. Netherlands: Kluwer Academic, 1993. p. 73-76.

Novais, R. F.; Smyth, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

Oliveira, C. M. B.; Gatiboni, L. C.; Miquelluti, D.J.; Smyth, T. J.; Almeida, J. A. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia de ligação em Latossolo Bruno em razão de diferentes ajustes do modelo de Lagmuir. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 38, p. 1805-1815, 2014.

Paiva, M. R. de F. C.; Silva, G. F. da; Oliveira, F. H. T. de; Pereira, R. G.; Queiroga, F. M. de. Doses de nitrogênio e de fósforo recomendadas para produção econômica de milho-verde na chapada do Apodi-RN. *Revista Caatinga, Mossoró*, v. 25, n. 4, p. 1-10, 2012.

Pinto, F. A.; Souza, E. D. de; Paulino, H. B.; Curi, N.; Carneiro, A. C. P-sorption and desorption in savanna brazilian soils as a support for phosphorus fertilizer management. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 37, p. 521-530, 2013.

Salcedo, I. H. Biogeoquímica do fósforo em solos da região semi-árida do NE do Brasil. *Revista de Geografia*, v. 23, p. 108-123, 2006.

Santos, H. C.; Oliveira, F. H. T. de; Souza, A. P. de; Salcedo, I. H.; Silva, V. D. M. Phosphorus availability as a function of its time of contact with different soils. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, n. 11, p. 996-1001. 2016.

Sims, J. T.; Pierzynski, G. M. Chemistry of phosphorus in soils. In: Tabatabai, M. A.; Sparks, D. L. *Chemical processes in Soils*. Madison: SSSA, 2005. Cap. 2, p.151-192.

Tedesco, M. J.; Gianello, C.; Bissani, C. A.; Bohnen, H.; Volkweiss, S. J. *Análises de solos, plantas e outros materiais*. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, 1995. 174p.,

Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017, 573 p.

Wadt, P. Q. S.; Silva, L. M. Determinação do Fósforo Remanescente para a avaliação da disponibilidade de fósforo em solos do Estado do Acre. Rio Branco: Embrapa Acre, 2011. 5p. (Embrapa Acre. Comunicado técnico, 178).

ANEXOS

Tabela 1A – Esquema de análise de variância para os teores de P no solo CX1 extraído pelo extrator Mehlich-1, em função do tempo de contato e de doses de P aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DOSE	3	66765.785529	22255.261843	727.316	0.0000**
TEMPO	6	9000.416229	1500.069371	49.023	0.0000**
DOSE*TEMPO	18	5697.029438	316.501635	10.343	0.0000**
DOSE	/1 3	9505.675425	3168.558475	103.550	0.0000**
DOSE	/2 3	13749.460892	4583.153631	149.780	0.0000**
DOSE	/3 3	9996.524000	3332.174667	108.898	0.0000**
DOSE	/4 3	13860.860433	4620.286811	150.994	0.0000**
DOSE	/5 3	16667.970758	5555.990253	181.573	0.0000**
DOSE	/6 3	1875.573692	625.191231	20.432	0.0000**
DOSE	/7 3	6806.749767	2268.916589	74.150	0.0000**
TEMPO	/1 6	10.928590	1.821432	0.060	0.9991ns
TEMPO	/2 6	965.927695	160.987949	5.261	0.0002**
TEMPO	/3 6	4790.625714	798.437619	26.093	0.0000**
TEMPO	/4 6	8929.963667	1488.327278	48.639	0.0000**
BLOCO	2	141.409502	70.704751	2.311	0.1089
erro	54	1652.355098	30.599168		
Total corrigido	83	83256.995795			
CV (%) =	15.56				
Média geral:	35.5502381	Número de observações:	84		

Tabela 2A – Esquema de análise de variância para os teores de P no solo CX2 extraído pelo extrator Mehlich-1, em função do tempo de contato e de doses de P aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DOSE	3	7225.824004	2408.608001	668.650	0.0000**
TEMPO	6	288.379729	48.063288	13.343	0.0000**
DOSE*TEMPO	18	471.939738	26.218874	7.279	0.0000**
DOSE	/1 3	1866.939267	622.313089	172.759	0.0000**
DOSE	/2 3	1598.322825	532.774275	147.903	0.0000**
DOSE	/3 3	1212.852825	404.284275	112.233	0.0000**
DOSE	/4 3	757.021233	252.340411	70.052	0.0000**
DOSE	/5 3	690.826967	230.275656	63.926	0.0000**
DOSE	/6 3	774.929267	258.309756	71.709	0.0000**
DOSE	/7 3	796.871358	265.623786	73.739	0.0000**
TEMPO	/1 6	6.705257	1.117543	0.310	0.9288ns
TEMPO	/2 6	45.412714	7.568786	2.101	0.0678ns
TEMPO	/3 6	130.880648	21.813441	6.056	0.0001**
TEMPO	/4 6	577.320848	96.220141	26.712	0.0000**
BLOCO	2	0.462660	0.231330	0.064	0.9379
erro	54	194.518540	3.602195		
Total corrigido	83	8181.124670			
CV (%) =	14.73				
Média geral:	12.8822619	Número de observações:	84		

Tabela 3A – Esquema de análise de variância para os teores de P no solo PVA extraído pelo extrator Mehlich-1, em função do tempo de contato e de doses de P aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DOSE	3	28226.435238	9408.811746	148.037	0.0000**
TEMPO	6	630.246579	105.041096	1.653	0.1507ns
DOSE*TEMPO	18	1586.431279	88.135071	1.387	0.1764ns
DOSE /1	3	2489.346967	829.782322	13.056	0.0000**
DOSE /2	3	4925.008967	1641.669656	25.830	0.0000**
DOSE /3	3	4937.262092	1645.754031	25.894	0.0000**
DOSE /4	3	3812.712967	1270.904322	19.996	0.0000**
DOSE /5	3	5415.096367	1805.032122	28.400	0.0000**
DOSE /6	3	4896.052467	1632.017489	25.678	0.0000**
DOSE /7	3	3337.386692	1112.462231	17.503	0.0000**
TEMPO /1	6	14.722629	2.453771	0.039	0.9997ns
TEMPO /2	6	327.864048	54.644008	0.860	0.5300ns
TEMPO /3	6	1113.331333	185.555222	2.920	0.0153*
TEMPO /4	6	760.759848	126.793308	1.995	0.0821ns
BLOCO	2	38.099450	19.049725	0.300	0.7422
erro	54	3432.077883	63.556998		
Total corrigido	83	33913.290429			
CV (%) =	31.09				
Média geral:	25.6385714	Número de observações:	84		

Tabela 4A – Esquema de análise de variância para os teores de P no solo VX extraído pelo extrator Mehlich-1, em função do tempo de contato e de doses de P aplicadas ao solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DOSE	3	821.969948	273.989983	631.493	0.0000**
TEMPO	6	94.432581	15.738763	36.275	0.0000**
DOSE*TEMPO	18	153.644352	8.535797	19.673	0.0000**
DOSE /1	3	418.385692	139.461897	321.432	0.0000**
DOSE /2	3	158.699300	52.899767	121.924	0.0000**
DOSE /3	3	127.633692	42.544564	98.057	0.0000**
DOSE /4	3	133.785367	44.595122	102.783	0.0000**
DOSE /5	3	65.210067	21.736689	50.099	0.0000**
DOSE /6	3	37.317292	12.439097	28.670	0.0000**
DOSE /7	3	34.582892	11.527631	26.569	0.0000**
TEMPO /1	6	0.491400	0.081900	0.189	0.9786ns
TEMPO /2	6	1.354648	0.225775	0.520	0.7901ns
TEMPO /3	6	24.247657	4.041276	9.314	0.0000**
TEMPO /4	6	221.983229	36.997205	85.271	0.0000**
BLOCO	2	0.227474	0.113737	0.262	0.7704
erro	54	23.429326	0.433876		
Total corrigido	83	1093.703681			
CV (%) =	22.88				
Média geral:	2.8788095	Número de observações:	84		

Tabela 5A – Esquema de análise de variância para os teores de P na parte aérea da planta, em função do tempo de contato e de doses de P aplicadas ao solo CX1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DOSE	3	112.843895	37.614632	271.832	0.0000**
TEMPO	6	47.022298	7.837050	56.636	0.0000**
DOSE*TEMPO	18	13.681921	0.760107	5.493	0.0000**
DOSE	/1 3	43.097133	14.365711	103.817	0.0000**
DOSE	/2 3	17.421758	5.807253	41.968	0.0000**
DOSE	/3 3	14.286758	4.762253	34.416	0.0000**
DOSE	/4 3	20.402825	6.800942	49.149	0.0000**
DOSE	/5 3	13.827092	4.609031	33.308	0.0000**
DOSE	/6 3	10.097158	3.365719	24.323	0.0000**
DOSE	/7 3	7.393092	2.464364	17.809	0.0000**
TEMPO	/1 6	0.900314	0.150052	1.084	0.3831ns
TEMPO	/2 6	16.452400	2.742067	19.816	0.0000**
TEMPO	/3 6	24.285590	4.047598	29.251	0.0000**
TEMPO	/4 6	19.065914	3.177652	22.964	0.0000**
BLOCO	2	0.558031	0.279015	2.016	0.1430
erro	54	7.472236	0.138375		
Total corrigido	83	181.578381			
CV (%) =	17.63				
Média geral:	2.1104762	Número de observações:	84		

Tabela 6A – Esquema de análise de variância para os teores de P na parte aérea da planta, em função do tempo de contato e de doses de P aplicadas ao solo CX2

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DOSE	3	31.475356	10.491785	207.718	0.0000**
TEMPO	6	16.373024	2.728837	54.026	0.0000**
DOSE*TEMPO	18	6.708852	0.372714	7.379	0.0000**
DOSE	/1 3	14.533067	4.844356	95.909	0.0000**
DOSE	/2 3	5.053400	1.684467	33.349	0.0000**
DOSE	/3 3	5.628333	1.876111	37.144	0.0000**
DOSE	/4 3	3.607358	1.202453	23.806	0.0000**
DOSE	/5 3	2.647825	0.882608	17.474	0.0000**
DOSE	/6 3	2.974358	0.991453	19.629	0.0000**
DOSE	/7 3	3.739867	1.246622	24.681	0.0000**
TEMPO	/1 6	0.569924	0.094987	1.881	0.1007ns
TEMPO	/2 6	6.393295	1.065549	21.096	0.0000**
TEMPO	/3 6	3.376133	0.562689	11.140	0.0000**
TEMPO	/4 6	12.742524	2.123754	42.046	0.0000**
BLOCO	2	0.644279	0.322139	6.378	0.0033
erro	54	2.727521	0.050510		
Total corrigido	83	57.929032			
CV (%) =	14.95				
Média geral:	1.5032143	Número de observações:	84		

Tabela 7A – Esquema de análise de variância para os teores de P na parte aérea da planta, em função do tempo de contato e de doses de P aplicadas ao solo PVA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DOSE	3	63.481452	21.160484	320.011	0.0000**
TEMPO	6	30.517907	5.086318	76.921	0.0000**
DOSE*TEMPO	18	11.211198	0.622844	9.419	0.0000**
DOSE	/1 3	33.490233	11.163411	168.825	0.0000**
DOSE	/2 3	10.394200	3.464733	52.397	0.0000**
DOSE	/3 3	6.992167	2.330722	35.248	0.0000**
DOSE	/4 3	5.624333	1.874778	28.352	0.0000**
DOSE	/5 3	6.791667	2.263889	34.237	0.0000**
DOSE	/6 3	8.055425	2.685142	40.607	0.0000**
DOSE	/7 3	3.344625	1.114875	16.860	0.0000**
TEMPO	/1 6	0.759467	0.126578	1.914	0.0949ns
TEMPO	/2 6	4.668400	0.778067	11.767	0.0000**
TEMPO	/3 6	15.564257	2.594043	39.230	0.0000**
TEMPO	/4 6	20.736981	3.456163	52.268	0.0000**
BLOCO	2	0.853486	0.426743	6.454	0.0031
erro	54	3.570714	0.066124		
Total corrigido	83	109.634757			
CV (%) =	15.39				
Média geral:	1.6707143	Número de observações:	84		

Tabela 8A – Esquema de análise de variância para os teores de P na parte aérea da planta, em função do tempo de contato e de doses de P aplicadas ao solo VX

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DOSE	3	41.631013	13.877004	208.274	0.0000**
TEMPO	6	21.105812	3.517635	52.795	0.0000**
DOSE*TEMPO	18	8.695445	0.483080	7.250	0.0000**
DOSE	/1 3	21.855092	7.285031	109.338	0.0000**
DOSE	/2 3	5.697825	1.899275	28.505	0.0000**
DOSE	/3 3	6.418833	2.139611	32.113	0.0000**
DOSE	/4 3	6.957825	2.319275	34.809	0.0000**
DOSE	/5 3	3.348492	1.116164	16.752	0.0000**
DOSE	/6 3	2.838567	0.946189	14.201	0.0000**
DOSE	/7 3	3.209825	1.069942	16.058	0.0000**
TEMPO	/1 6	0.429895	0.071649	1.075	0.3884ns
TEMPO	/2 6	1.869467	0.311578	4.676	0.0007**
TEMPO	/3 6	9.585714	1.597619	23.978	0.0000**
TEMPO	/4 6	17.916181	2.986030	44.816	0.0000**
BLOCO	2	0.691993	0.345996	5.193	0.0087
erro	54	3.597940	0.066629		
Total corrigido	83	75.722204			
CV (%) =	14.45				
Média geral:	1.7860714	Número de observações:	84		

Tabela 9A – Esquema de análise de variância para os dados de matéria seca da parte aérea de plantas de milho, em função do tempo de contato e de doses de P aplicadas ao solo CX1

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DOSE	3	348.874489	116.291496	193.158	0.0000**
TEMPO	6	15.776579	2.629430	4.367	0.0012**
DOSE*TEMPO	18	20.669402	1.148300	1.907	0.0351*
DOSE	/1 3	43.325958	14.441986	23.988	0.0000**
DOSE	/2 3	36.276492	12.092164	20.085	0.0000**
DOSE	/3 3	31.953667	10.651222	17.692	0.0000**
DOSE	/4 3	58.968425	19.656142	32.649	0.0000**
DOSE	/5 3	61.166758	20.388919	33.866	0.0000**
DOSE	/6 3	69.331767	23.110589	38.386	0.0000**
DOSE	/7 3	68.520825	22.840275	37.937	0.0000**
TEMPO	/1 6	0.153381	0.025563	0.042	0.9996ns
TEMPO	/2 6	5.996924	0.999487	1.660	0.1484ns
TEMPO	/3 6	14.525695	2.420949	4.021	0.0021**
TEMPO	/4 6	15.769981	2.628330	4.366	0.0011**
BLOCO	2	37.535707	18.767854	31.173	0.0000
erro	54	32.510826	0.602052		
Total corrigido	83	455.367004			
CV (%) =	5.56				
Média geral:	13.9639286	Número de observações:	84		

Tabela 10A – Esquema de análise de variância para os dados de matéria seca da parte aérea de plantas de milho, em função do tempo de contato e de doses de P aplicadas ao solo CX2

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DOSE	3	193.453038	64.484346	307.229	0.0000**
TEMPO	6	55.696467	9.282744	44.227	0.0000**
DOSE*TEMPO	18	23.840429	1.324468	6.310	0.0000**
DOSE	/1 3	64.353892	21.451297	102.203	0.0000**
DOSE	/2 3	31.210092	10.403364	49.566	0.0000**
DOSE	/3 3	34.082425	11.360808	54.127	0.0000**
DOSE	/4 3	24.990825	8.330275	39.689	0.0000**
DOSE	/5 3	26.807500	8.935833	42.574	0.0000**
DOSE	/6 3	18.595767	6.198589	29.533	0.0000**
DOSE	/7 3	17.252967	5.750989	27.400	0.0000**
TEMPO	/1 6	0.242848	0.040475	0.193	0.9774ns
TEMPO	/2 6	27.916429	4.652738	22.167	0.0000**
TEMPO	/3 6	36.703495	6.117249	29.145	0.0000**
TEMPO	/4 6	14.674124	2.445687	11.652	0.0000**
BLOCO	2	2.314867	1.157433	5.514	0.0066
erro	54	11.334067	0.209890		
Total corrigido	83	286.638867			
CV (%) =	3.66				
Média geral:	12.5233333	Número de observações:	84		

Tabela 11A – Esquema de análise de variância para os dados de matéria seca da parte aérea de plantas de milho, em função do tempo de contato e de doses de P aplicadas ao solo PVA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DOSE	3	343.010524	114.336841	379.319	0.0000**
TEMPO	6	8.034695	1.339116	4.443	0.0010**
DOSE*TEMPO	18	21.884143	1.215786	4.033	0.0000**
DOSE	/1 3	55.044967	18.348322	60.872	0.0000**
DOSE	/2 3	46.558425	15.519475	51.487	0.0000**
DOSE	/3 3	58.079667	19.359889	64.228	0.0000**
DOSE	/4 3	63.218467	21.072822	69.910	0.0000**
DOSE	/5 3	41.821292	13.940431	46.248	0.0000**
DOSE	/6 3	41.838758	13.946253	46.268	0.0000**
DOSE	/7 3	58.333092	19.444364	64.508	0.0000**
TEMPO	/1 6	0.379667	0.063278	0.210	0.9721ns
TEMPO	/2 6	12.338667	2.056444	6.822	0.0000**
TEMPO	/3 6	13.637124	2.272854	7.540	0.0000**
TEMPO	/4 6	3.563381	0.593897	1.970	0.0858ns
BLOCO	2	6.661850	3.330925	11.051	0.0001
erro	54	16.277017	0.301426		
Total corrigido	83	395.868229			
CV (%) =	4.05				
Média geral:	13.5585714	Número de observações:	84		

Tabela 12A – Esquema de análise de variância para os dados de matéria seca da parte aérea de plantas de milho, em função do tempo de contato e de doses de P aplicadas ao solo VX

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
DOSE	3	482.085213	160.695071	309.049	0.0000**
TEMPO	6	22.844924	3.807487	7.323	0.0000**
DOSE*TEMPO	18	19.628895	1.090494	2.097	0.0188*
DOSE	/1 3	67.910625	22.636875	43.535	0.0000**
DOSE	/2 3	86.171300	28.723767	55.242	0.0000**
DOSE	/3 3	82.946092	27.648697	53.174	0.0000**
DOSE	/4 3	77.832300	25.944100	49.896	0.0000**
DOSE	/5 3	68.858000	22.952667	44.143	0.0000**
DOSE	/6 3	52.815300	17.605100	33.858	0.0000**
DOSE	/7 3	65.180492	21.726831	41.785	0.0000**
TEMPO	/1 6	0.739333	0.123222	0.237	0.9623ns
TEMPO	/2 6	30.968590	5.161432	9.926	0.0000**
TEMPO	/3 6	4.737848	0.789641	1.519	0.1893ns
TEMPO	/4 6	6.028048	1.004675	1.932	0.0919ns
BLOCO	2	6.699779	3.349889	6.443	0.0031
erro	54	28.078221	0.519967		
Total corrigido	83	559.337032			
CV (%) =	4.95				
Média geral:	14.5532143	Número de observações:	84		