CLAUDIA BORGMANN

MOVIMENTAÇÃO DE NUTRIENTES EM LATOSSOLO ARGILOSO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

CASCAVEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2019

CLAUDIA BORGMANN

MOVIMENTAÇÃO DE NUTRIENTES EM LATOSSOLO ARGILOSO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura da Universidade Estadual do Oeste do Paraná para fins de obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura.

Orientador: Prof. Dr. Deonir Secco

Coorientadores: Prof. Dr. Rogério Luiz Rizzi
Prof. Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior

CASCAVEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2019

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Borgmann, Claudia
Movimentação de nutrientes em latossolo argiloso sob sistema plantio direto / Claudia Borgmann; orientador(a), Deonir Secco; coorientador(a), Luiz Antônio Zanão Júnior, coorientador(a)II, Rogério Luiz Rizzi, 2019.
94 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2019.

1. Calagem. 2. Gessagem. 3. Sistema Plantio Direto. 4. Compactação. I. Secco, Deonir. II. Zanão Júnior, Luiz Antônio . III. Rizzi, Rogério Luiz . IV. Título.

CLAUDIA BORGMANN

Movimentação de nutrientes em Latossolo argiloso sob sistema plantio direto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biomassa e Culturas Energéticas, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a) - Deonir Secco
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Doglas Bassegio
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Tiago Roque Benetoli da Silva
Universidade Estadual de Maringá - Campus Regional de Umuarama (UEM)

Cascavel, 15 de março de 2019

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha existência, pela força de vontade de superar as dificuldades e pelas oportunidades que Ele acredita que eu possa ser capaz de cumprir.

Aos meus familiares, Almir e Lurdes Borgmann, Silvio e Etelvina Bettoni, pelas orações, carinho, conselhos, exemplos e apoio incondicionalmente a mim dedicados, em todas as etapas da minha vida.

À Djonathan Hubert Mohr Grams que sempre me incentivou a buscar pelo novo e me tornar bem-sucedida profissionalmente.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná, por me acolher, e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo fomento concedido.

Ao Instituto Agronômico do Paraná - IAPAR, por ceder local do experimento e oportunizar a realização deste trabalho.

Ao técnico agrícola do IAPAR Luiz Carlos, que proporcionou todo o auxílio a campo.

Aos responsáveis químicos do Laboratório de Solos do IAPAR, Clair Basso e Carla Limberger, pela realização das análises químicas do experimento.

Ao Professor Dr. Deonir Secco, pela orientação, competência, profissionalismo e dedicação tão importantes. Agradeço imensamente pela oportunidade e confiança concebida em meu trabalho.

À Professora Aracéli Ciotti Marins, por ter sido a primeira a acreditar e apoiar a minha carreira na Pós-Graduação, compartilhando seus conhecimentos e corroborando em todos os momentos de dificuldades.

Ao Professor Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior, pela orientação e auxílio durante o desenvolvimento e realização do projeto.

Ao Professor Rogério Rizzi, pelo empenho, orientação e abertura de visão para uma nova forma de usar a matemática.

Aos demais professores do Programa de Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura, que agregaram conhecimento nesta trajetória.

Aos amigos Simone Andréia Roehrs e Pablo Chang, pelos trabalhos e disciplinas realizados em conjunto.

Ao grupo do Laboratório de Física do Solo – LAFIS – pelo convívio e pelas inúmeras vezes nas quais colaboraram nos trabalhos em campo experimental e/ou de laboratório.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

LISTA DE SÍMBOLOS

Al - Alumínio;

Ca - Cálcio;

K - Potássio;

Mg - Magnésio;

Mn - Manganês;

N - Nitrogênio;

P - Fósforo;

pH - potencial Hidrogeniônico;

S - Enxofre;

CTC - Capacidade de troca catiônica;

CV - Coeficiente de variação;

Dms - Diferença mínima significativa;

Ds - Densidade do solo em (Mg m^{-3});

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;

H^+ - Hídron;

IAPAR - Instituto Agronômico do Paraná;

Ksat - Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1});

LAFIS - Laboratório de física do solo;

LVdf - Latossolo Vermelho Distroférrico típico;

Macro - Macroporosidade do solo (%);

Micro - Microporosidade (%);

MSS - Massa de solo seco (Mg).

MSU - Massa de solo após a tensão de 0,6 m.c.a;

Pt - Porosidade total (%);

SPD - Sistema plantio direto;

t ha^{-1} – Toneladas por hectare;

UNIOESTE - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição granulométrica do solo nas camadas de 0-0,1, 0-1-0-2 e 0,2-0,3 m da área experimental do IAPAR/Santa Tereza (valores médios de 3 repetições).....18

Tabela 2. Grau de compactação (GC) obtido a partir da relação entre densidade do solo (DS) e a densidade crítica estabelecida pelo intervalo hídrico ótimo (IHO). 25

Tabela 3. Valores médios dos atributos físicos do solo do ano de 2017 nas três camadas, quatro níveis de compactação (média de 12 repetições).....30

Tabela 4. Valores médios dos atributos físicos do solo do ano de 2018 nas três camadas avaliadas e nos quatro níveis de compactação (média de 12 repetições). 31

Tabela 5. Ajustes dos parâmetros de cada profundidade em relação ao tempo. 33

Tabela 6. Ajuste dos ajustes (Tabela 5) considerando a profundidade. 34

Tabela 7. Valores médios de pH ($CaCl_2$) das camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,1; 0,1-0-0,2 e 0,2-0,4 m aos 0, 3, 6, 9 e 12 meses após a instalação do experimento. 35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Precipitação pluviométrica e temperatura média da cultura da soja no período de outubro a fevereiro nos anos de 2017 e 2018. 19

Figura 2. Disposição dos tratamentos envolvendo estados de compactação (0, 1, 3 e 5 passadas do rolo compactador) e aplicações de calcário e gesso agrícola. 20

Figura 3. Diagrama da interação média de DS, PT, MACRO, MICRO nos níveis de compactação do ano de 2017 (0P-testemunha; 1P-1passada; 3P-3 passadas e; 5P-5 passadas do rolo compactador) entre as camadas (C1: 0,0-0,1m; C2: 0,1-0,2m; C3: 0,2-0,3m). 28

Figura 4. Diagrama da interação média de DS, PT, MACRO, MICRO nos níveis de compactação do ano de 2018 (0P-testemunha; 1P-1passada; 3P-3 passadas e; 5P-5 passadas do rolo compactador) entre as camadas (C1: 0,0-0,1m; C2: 0,1-0,2m; C3: 0,2-0,3m). 29

Figura 5. Ajustes do modelo matemático aos dados experimentais médios da concentração de potássio (K) ao longo dos meses coletados (0, 3, 6, 9 e 12 meses). 33

Figura 6. Superfície originada por meio do novo ajuste aos valores da profundidade. 34

Figura 7. Concentração de Ca no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT1, 1PT1, 3PT1, 5PT1, 0PT2, 1PT2, 3PT2 e 5PT2). 43

Figura 8. Concentração de Ca no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT3, 1PT3, 3PT3, 5PT3, 0PT4, 1PT4, 3PT4 e 5PT4). 44

Figura 9. Saturação por Al no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT1, 1PT1, 3PT1, 5PT1, 0PT2, 1PT2, 3PT2 e 5PT2). 50

Figura 10. Saturação por Al no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT3, 1PT3, 3PT3, 5PT3, 0PT4, 1PT4, 3PT4 e 5PT4). 51

Figura 11. Concentração de Mg no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT1, 1PT1, 3PT1, 5PT1, 0PT2, 1PT2, 3PT2 e 5PT2). 58

Figura 12. Concentração de Mg no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT3, 1PT3, 3PT3, 5PT3, 0PT4, 1PT4, 3PT4 e 5PT4).....59

Figura 13. Concentração de K no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT1, 1PT1, 3PT1, 5PT1, 0PT2, 1PT2, 3PT2 e 5PT2).....65

Figura 14. Concentração de K no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT3, 1PT3, 3PT3, 5PT3, 0PT4, 1PT4, 3PT4 e 5PT4).....66

Figura 15. Boxplot da massa de 100 grãos de soja (gramas) considerando os tratamentos. 70

BORGMANN, C. MSc. UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Março de 2019. Movimentação de Nutrientes em Latossolo Argiloso sob Sistema Plantio Direto. Orientador: Prof. Dr. Deonir Secco. Coorientadores: Prof. Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior e Prof. Dr. Rogério Luiz Rizzi.

RESUMO

A produtividade das culturas é condicionada pelas características genéticas de cada espécie vegetal, contudo, também pode ser influenciada por fatores químicos e físicos do solo. Em relação aos fatores químicos, é necessária a correção do pH do solo, realizada com a prática da calagem, acompanhada da gessagem. No entanto, o gesso lixivia alguns nutrientes para camadas mais profundas do solo. O sistema de manejo mais adotado é o Sistema de Plantio Direto (SPD) que, por suas características de implementação e manutenção, vem causando compactação do solo. Logo, compreender a movimentação de nutrientes em solo com alta densidade se torna importante para que futuras correções na forma de manejo do solo sejam adotadas. Esse experimento tem como objetivo avaliar os danos gerados pela compactação, as aplicações isoladas ou combinadas de Calcário e Gesso, no processo de movimentação no perfil do solo dos nutrientes (cálcio, magnésio, potássio e saturação por alumínio) em Latossolo argiloso sob SPD. A área experimental esteve localizada no Instituto Agronômico do Paraná, no município de Santa Teresa do Oeste. Os tratamentos consistiram em níveis de compactação, combinados com a aplicação de calcário e gesso agrícola. O experimento esteve organizado em DIC em esquema em faixas. Para avaliar a estrutura do solo, foram realizadas coletas físicas antes do plantio e após a colheita da soja e, para determinar as taxas de movimentação, foram realizadas análises químicas do solo de dados coletados antes da implantação do experimento, aos 3, 6, 9 e 12 meses após a semeadura da soja. A análise estatística foi realizada utilizando o software R e Sisvar 5.6 e, por meio do software Statistic, foi descrito um ajuste matemático de predição da movimentação de nutrientes no solo. Com base nas análises identificou-se nos tratamentos que receberam maior compactação do solo um pior estado estrutural. A movimentação dos nutrientes (Ca, Mg e K) e a saturação por alumínio no perfil do solo ao longo do tempo foram influenciadas pelo estado estrutural do solo e pelas aplicações combinadas de gesso e calcário. Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Palavras-chave: Gessagem, calagem, compactação, SPD.

BORGMANN, C. MSc. UNIOESTE – State University of West Paraná. March 2019. Nutrient Movement in Oxisoil under no tillage. Adviser: Prof. Dr. Deonir Secco. Co-advisers: Prof. Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior and Prof. Dr. Rogério Luiz Rizzi.

ABSTRACT

The crops grain yeld is conditioned by the genetic characteristics of each plant species, however, it can be influenced by chemical and physical factors of the soil. In relation to the chemical factors, it is necessary to correct the pH of the soil, performed with the practice of liming, with by the plaster. However, gypsum leaches some nutrients to deeper layers of soil. The management system most adopted is the no tillage, which, due to its implementation and maintenance characteristics, has been causing soil compaction. Therefore, understanding the movement of nutrients in a soil with high density becomes important so that future corrections in the form of soil management are adopted. This experiment aims at the protection generated by compaction, such as isolated and combined applications of Limestone and Plaster, without any compaction process, such as magnesium, potassium and aluminum saturation in clayey Oxisol under SPD. An experimental area was located at the Agronomic Institute of Paraná, in Santa Teresa do Oeste. The treatments consisted of compaction levels, combined with an application of gauge and agricultural gypsum. The experiment was organized in ICD in a striped scheme. In order to evaluate soil production, samples were taken before planting and after soybean harvest and, to determine the rates of movement, soil chemical analyzes of samples prior to the implantation of the experiment were done at 3, 6, 9 and 12 months after soybean sowing. A statistic was made using software R and Sisvar 5.6 and, through the software Statistic, was applied to a mathematical program of prediction of the movement of nutrients in the soil. Based on the analogues, a worse structural condition was identified in the treatments that received the highest soil compaction. The nutrient movement (Ca, Mg and K) and soil saturation were not extensive to the soil and over time were influenced by the soil structural state and the combined applications of gypsum and limestone. This work was carried out with the support of the Coordination of Improvement of Higher Level Personnel (CAPES) - Financing Code 001.

KEYWORDS: Gypsum, liming, compaction, SPD.

ÍNDICE

RESUMO ..... **viii**
ABSTRACT ..... **ix**
1. INTRODUÇÃO **1**
2. REVISÃO DE LITERATURA **3**
2.1. Sistema plantio direto e produtividade dos cultivos agrícolas 3
2.2. Importância da calagem no desenvolvimento e rendimento de grãos de cultivos agrícolas 5
2.3. Importância da gessagem no desenvolvimento e rendimento de grãos de cultivos agrícolas ... 8
2.4. Movimentação de nutrientes 11
2.4.1. Movimentação do potássio 13
2.4.2. Movimentação do cálcio 14
2.4.3. Movimentação de magnésio 15
2.4.4. Saturação por alumínio 15
2.5. Análise da movimentação de nutrientes. 16
3. MATERIAL E MÉTODOS **18**
3.1. Localização e descrição da área de estudo 18
3.2. Delineamento experimental e descrição dos tratamentos 19
3.3. Condução da cultura estudada 21
3.4. Avaliações e determinações químicas, físicas e de produtividade de grãos 22
3.5. Grau de compactação do solo 24
3.6. Análise estatística dos dados 25
3.7. Movimentação de nutrientes no perfil do solo 25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO **28**
4.1. Estatística descritiva e ANOVA: aspectos físicos do solo 28
4.2. Movimentação de nutrientes no perfil do solo 32
4.2. Correção do pH 35
4.2. Movimentação do cálcio 39
4.3. Saturação por alumínio 46
4.4. Movimentação do Magnésio 53
4.5. Movimentação do potássio 60
4.6. Componentes de produção da cultura da soja 68
5. CONCLUSÕES **71**
REFERÊNCIAS **72**

1. INTRODUÇÃO

Os Latossolos, classe de solos predominante da região oeste do Paraná, em sua maioria, são muito propensos à compactação em razão da coesividade de suas partículas, o que pode dificultar o crescimento de raízes, absorção de água e o adequado aproveitamento dos nutrientes disponíveis no perfil do solo (SOUZA et al., 2018).

A compactação promove alteração estrutural e reorganização das partículas e seus agregados, aumenta os níveis de densidade, diminui a porosidade do solo e, influencia negativamente no controle da temperatura, nas trocas gasosas, no crescimento radicular e, principalmente, no transporte de água e nutrientes. Sendo assim, essas condições podem dificultar tanto o bom uso de nutrientes, quanto o aumento da produtividade. Logo, torna-se necessário aumentar a eficiência no uso dos nutrientes para melhorar a sustentabilidade agrícola (MOURA et al., 2013).

O objetivo de qualquer produtor é obter alta produtividade dos cultivos agrícolas, e existem muitos fatores agronômicos que podem influenciar isso. Além do sistema de manejo, é necessário considerar o comportamento das culturas em relação aos componentes químicos presentes no perfil do solo.

A planta retira os nutrientes diretamente da solução do solo e os absorve com maior eficiência em soluções com pH em água de 5,5 a 6,5. Em solos com pH próximo da neutralidade, há melhores condições aos microrganismos realizarem rapidamente processos de mineralização para, em seguida, liberar os nutrientes as plantas a partir de restos orgânicos (ZANDONÁ et al., 2015).

Para a correção do pH, é realizada a prática da calagem, que tem benefícios como o aumento da disponibilidade de fósforo (P), redução da disponibilidade de alumínio (Al) e manganês (Mn), o aumento da mineralização da matéria orgânica e, consequentemente, uma maior disponibilidade de nutrientes. Em relação às propriedades físicas do solo, a calagem aumenta a agregação, pois o Cálcio (Ca) é um cátion floculante, que contribui para a diminuição da compactação (ALBUQUERQUE et al., 2005).

Contudo, a prática da calagem, no sistema plantio direto, é realizada sem a incorporação no solo, somente aplicada superficialmente. A aplicação superficial do calcário, aliado à baixa mobilidade do íon Ca no perfil do solo, tem se caracterizado

como um problema quando se deseja correção do pH em camadas mais profundas do perfil do solo (CAIRES et al., 2011). Para amenizar essa baixa mobilidade do calcário, alguns produtores da região têm realizado aplicações de gesso agrícola após a calagem objetivando maior correção da acidez do solo em camadas mais profundas, uma vez que a mobilidade do enxofre (S) presente no gesso agrícola ser maior que a do Ca, contribuindo para um maior carreamento deste em profundidade (MALAVOLTA, 2005).

As vantagens da utilização do gesso na agricultura estão relacionadas com a sua fácil penetração no perfil do solo, devido à alta solubilidade. Além disso, também consegue fornecer Ca em profundidade, reduzindo a saturação do Al em subsuperfícies, de modo a aprofundar o sistema radicular, melhorando a distribuição no sistema radicular e a absorção de água e nutrientes (CAIRES et al., 2001; 2002; 2003; 2004; 2011).

Por conta da capacidade de movimentação de bases trocáveis do gesso no perfil do solo, alguns problemas estão relacionados ao seu uso, pois, dependendo da dosagem, pode contribuir para a lixiviação de alguns nutrientes nas camadas mais profundas do solo, distantes da superfície absorvedora das raízes.

O sistema de manejo mais adotado é o SPD que, por suas características de implementação como não mobilização, aliado com a alta coesividade dos Latossolos, vem causando compactação do solo. Logo, compreender a movimentação de nutrientes em um solo com alta densidade se torna importante para que futuras correções na forma de manejo do solo sejam adotadas.

Considerando a necessidade de aprimorar os conhecimentos sobre a disponibilidade de Potássio (K), Magnésio (Mg), Cálcio (Ca) e a saturação por Alumínio (Al) em condições de plantio direto, este trabalho objetiva avaliar a movimentação destes nutrientes no perfil de um Latossolo argiloso sob sistema plantio direto na região Oeste do Paraná.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Sistema plantio direto e produtividade dos cultivos agrícolas

Atualmente, no Brasil, tem aumentado o interesse pela busca de alternativas que minimizem o impacto do manejo no solo, principalmente no momento da implantação de culturas. Nesse sentido, o Sistema de Plantio Direto (SPD) não proporciona o revolvimento do solo, considerado como sistema conservacionista de solo e água (DERPSCH et al., 1991).

Este se constitui como ferramenta da agricultura capaz de viabilizar o ato de produzir sem preparo prévio do solo, de modo contínuo, safra após safra, requerendo a menor utilização de máquinas e equipamentos, utilizando apenas o corte da palha na linha da semeadura (GARRAFA et al., 2016).

A palhada ao ser deixada por culturas de cobertura sobre a superfície do solo, como também os resíduos das culturas comerciais, criam um ambiente extremamente favorável ao crescimento vegetal (HECLER et al., 1998; FREITAS et al., 2017). Contribuindo, de certo modo, para a estabilização da produção e para a recuperação ou manutenção da qualidade do solo, que é determinante para que esse sistema de plantio tenha sucesso. Há aumento de matéria orgânica, que é fonte de energia para os microrganismos (BAYER; BERTOL, 1999; BAYER et al., 2000; AMADO et al., 2001).

Ao mesmo tempo, este sistema de plantio contribui para a agregação do solo, ciclagem de nutrientes e acidificação do solo, com prováveis reflexos no desenvolvimento e rendimento das culturas comerciais (SÁ et al., 1993; FREITAS et al., 2017). Esta acidificação em plantio direto, provavelmente, está relacionada com o aumento da concentração eletrolítica, evidenciado pela maior condutividade elétrica (CIOTTA et al., 2002).

Proporcionando incremento da porosidade e capacidade de retenção hídrica, bem como por deixar no solo uma camada de cobertura vegetal, contribui para reduzir o impacto erosivo das chuvas, aquecimento do solo e evapotranspiração (HECLER et al., 1998; ALVEZ et al., 2017).

Contudo, se o SPD não for bem estabelecido, com a sucessão de culturas erroneamente usando plantas que não têm um alto potencial de fitomassa, o sistema

pode acabar em processo de degradação e compactação do solo (FREITAS et al., 2017). Isto porque a manutenção de matéria orgânica no manejo do solo e sistemas de plantio direto, afetam os aspectos físicos, químicos e biológicos, consequentemente, a viabilidade da produção (DEBIASI et al., 2013; VALADÃO et al., 2017).

As interações entre os compartimentos químicos e físicos do solo podem influenciar a absorção de nutrientes pelas plantas e provocar alterações na produtividade. De acordo com o sistema de manejo do solo, pode haver revolvimento da camada arável ou não, e isto é o fator que é crucial na intensidade e a localização da acidez do solo (SÁ et al., 1993).

Isto se deve ao fato de que, no SPD, os fertilizantes são geralmente distribuídos na superfície do solo e, por sua vez, podem afetar o pH do solo pela liberação de íons H^+ interferindo diretamente no desenvolvimento e produtividade das culturas (BARBOSA et al., 2005). O fato desse tipo de manejo não revolver o solo deixa na superfície os fertilizantes de reação ácida, que, ao não serem incorporados, concentram na superfície do solo o efeito ácido da nitrificação do amônio e da dissolução dos fosfatos solúveis de cálcio (CIOTTA et al., 2002).

Uma grande proporção dos solos brasileiros cultiváveis demonstra alta acidez, sendo uma das principais responsáveis pela baixa produtividade das culturas (VELOSO et al., 1992). Por vezes, um solo ácido tem algumas características como: possuir altos teores de Al trocável, contrapor baixos teores de bases trocáveis e teores de manganês ou ferro disponíveis tão altos que podem se tornar tóxicos para as culturas. Nesses casos, são comuns problemas de toxidez por Al e, em algumas regiões, manganês, que reduzem o desenvolvimento de raízes e o desenvolvimento das plantas.

Como causas principais da acidez do solo, temos a erosão que remove a camada mais superficial, desestabilizando-a com a lavagem do perfil pelas águas da chuva. Concomitante a isso, a dissolução dos fertilizantes fosfatados e a nitrificação dos nitrogenados amoniacais tendem a contribuir para a acidificação da camada superficial do solo (CIOTTA, 2002). Em contrapartida, o revolvimento do solo com aração e gradagens no preparo convencional dilui a acidez originada pelos fertilizantes em toda a camada arável.

A decomposição da matéria orgânica também se constitui um dos principais processos de adição de íons de H^+ ao solo por meio da formação de compostos orgânicos saturados de H^+, os quais atuam como ácidos fracos aumentando a acidez do solo em intensidade variável, dependendo da quantidade e qualidade da matéria orgânica (BARBOSA et al., 2005).

A intensificação do cultivo pode culminar com a retirada do Ca e Mg do perfil do solo, acarretando na diminuição do pH (LIMA; SIRTOLI, 2006). Os solos se tornam ácidos quando elementos básicos como Ca, Mg, sódio e K retidos por coloides de solo são substituídos por íons de hidrogênio. O motivo está na troca iônica que ocorre entre as raízes das plantas e os coloides do solo. Por esse processo, ao absorverem os íons Ca, Mg e outras bases as plantas passam a liberar íons H^+ no meio, aumentando a acidez do solo.

A manutenção de um nível adequado de pH no solo assegura disponibilidade de nutrientes e maximiza produtividade. No Brasil, aumentos na produção de soja, em solos corrigidos têm sido demonstrados por seu efeito no aumento do pH , na redução de Al e Mn tóxicos, no aumento da absorção de N, P, K e no fornecimento de Ca e Mg.

2.2. Importância da calagem no desenvolvimento e rendimento de grãos de cultivos agrícolas

A planta retira os nutrientes diretamente da solução do solo e absorve com grande eficiência em soluções com pH em água de 5,5 a 6,5. A neutralidade dessa solução afeta diretamente a eficiência da absorção de nutrientes pelas células das raízes da planta e, assim, sua produtividade (ZANDONÁ et al., 2015). Em solos com ácidos, as reservas de nutrientes na matéria orgânica deixam de ser utilizadas, pois somente com pH próximo da neutralidade os agentes realizam rapidamente o processo de mineralização, liberando os nutrientes para as plantas.

A maioria dos solos do Brasil são intemperizados e a acidez é um dos fatores que limitam a produtividade (KOSTIC et al., 2015; SANTOS et al., 2016; LI et al., 2016). Em razão desse elevado grau de intemperização, os solos da região Oeste do Paraná possuem a característica de normalmente serem ácidos e compostos,

principalmente por caulinita e óxidos e hidróxidos de ferro e Al, que atribuem baixa capacidade de troca catiônica (CTC) (COUTINHO et al., 2014).

O processo de acidificação do solo tem como início a solubilização da rocha, com posterior perda de cátions do solo associada à retenção preferencial de cátions de maior valência, como o Al, nos sítios de troca da argila e da matéria orgânica (COUTINHO et al., 2014).

Os solos com pH ácido têm a sua fertilidade comprometida, culminando no desequilíbrio da disponibilidade de nutrientes, justapondo condições a elementos tóxicos para a planta, sendo que, em consequência, temos redução da produtividade dos cultivos agrícolas (QUAGGIO et al., 1993).

Para solucionar este problema, a correção do pH é uma prática indispensável no processo de construção da fertilidade e correção do perfil do solo. Algo que deve ser ressaltado é que, mesmo havendo a correção prévia da acidez do perfil do solo no SPD, ela persiste por ser um processo contínuo. A correção do pH para fins agrícolas faz uso de uma prática denominada calagem. Esta visa corrigir as deficiências químicas e biológicas por meio da incorporação de certos compostos de Ca e Mg (MELLO et al., 1983).

A prática consolidada da calagem nessas condições visa à redução da acidez do solo, neutralização do Al a redução da disponibilidade de Mn que, em excesso, torna-se tóxico para as plantas (COUTINHO et al., 2014).

A calagem é também considerada uma das melhores práticas, pois a elevação do pH ocasionada por ela aumenta a disponibilidade de fósforo, sendo este um dos nutrientes determinantes para o crescimento das plantas por conta da sua importância no metabolismo do carbono (RABOIN et al., 2016).

Com a prática da calagem, há aumento da concentração de íons e sais, como consequência da dose de corretivo aplicada e da magnitude dos efeitos da calagem sobre os processos do solo que regulam a disponibilidade de nutrientes. Além disso, estudos mostram que a condutividade elétrica aumenta em razão do acréscimo dos níveis de calagem, bem como há relação positiva entre os teores de Ca^{2+}, Mg^{2+}, saturação por bases e pH para cada classe de solo em particular (CARMO et al., 2016).

Entretanto, a calagem realizada de modo excessivo é inconveniente, principalmente pelo fato de causar insolubilização, perda de disponibilidade de

vários micronutrientes, assim como com um grande desbalanço nutricional por conta da elevação demasiada do pH (GOMES et al. 1996; COSTA et al., 2012; DO CARMO et al. 2016; SHEER et al., 2017). Nota-se que, do ponto de vista prático, a calagem realizada adequadamente serve para propiciar um melhoramento do potencial de aquisição do macronutriente P pelas plantas (KOSTIC et al., 2015).

Para a maioria das culturas, é conveniente regular a quantidade de corretivo necessária para manter o pH (em água) do solo entre 5,5 ou pouco menos que 6,5. Nota-se que a frequência da aplicação depende, dentre vários outros fatores, da textura do solo (NETO, 2017).

Vários estudos vêm demonstrando a importância do Ca no equilíbrio nutricional das plantas, principalmente na interação com Mg, K, e Mn (RODRIGHERO et al., 2015; NETO, 2017; BORGES et al. 2018; BOSSOLANI, 2018). Além disso, a reaplicação de calcário em determinados períodos mantém o sucesso do efeito da calagem (BOSSOLANI, 2018).

Outro entrave é que a ação da calagem no solo é restrita apenas a uma pequena área em torno do local de aplicação, pela sua baixa mobilidade e solubilidade, pois para que resultados adequados sejam obtidos, é necessário que a realização da calagem seja aplicada antecipadamente, isto é, três meses antes quanto ao início do período de semeadura (CAIRES et al., 2003; SILVA et al., 2015).

Tratando-se de culturas perenes, a calagem deve ser feita superficialmente, podendo-se incorporar levemente o calcário ao solo por meio de grade (MELLO et al., 1983). Entretanto, em culturas sob sistema plantio direto, o revolvimento do solo não é realizado, uma vez que esta prática altera as propriedades físicas do solo, reduzindo a porosidade, desestruturando os agregados e destruindo canais e galerias formadas por raízes e microrganismos do solo.

Como consequência, há redução na infiltração de água e aumento no escoamento superficial, provocando erosões (ZANDONÁ et al., 2005; COSTA et al., 2016). Por estes motivos, mesmo nos dias de hoje, questionamentos são iniciados em relação a sua eficiência, uma vez que os corretivos de acidez do solo apresentam baixa solubilidade em água e, portanto, baixa mobilidade nas camadas do perfil do solo (BOSSOLANI, 2018).

Não obstante, a calagem cria uma frente de correção da acidez do solo em profundidade, que é proporcional à dose e ao tempo. No entanto, considerando o

SPD, a amenização da acidez ocorre nas camadas mais superficiais (RODRIGHERO et al., 2015; BORGES et al., 2018).

2.3. Importância da gessagem no desenvolvimento e rendimento de grãos de cultivos agrícolas

Um dos entraves da produção agrícola nos solos com pH ácidos, em que é realizada a prática da calagem, é a ausência de teores adequados de Ca em subsuperfícies, fato este que se torna mais grave na presença de toxidez de Al. A aplicação de gesso na superfície do solo tem sido indicada como alternativa de solução do problema, pois a lixiviação do Ca proporciona considerável aumento de sua concentração e diminuição na saturação de Al em subsuperfícies, colaborando para o aumento do crescimento das raízes nessas camadas (ZANDONÁ et al., 2015).

Desde a década de 1990, o gesso tem sido utilizado no SPD para minimizar problemas de acidez, pela redução na toxidade por Al^{3+}. Na maioria das vezes, a forma da correção da acidez é realizada na superfície, a lanço, porém sem incorporação, promovendo somente efeitos superficiais (ZANDONÁ et al., 2015; BORGES et al., 2018). No entanto, em razão da baixa mobilidade dos produtos provenientes da dissolução do calcário, a mobilidade se torna limitada culminando, assim, na limitação da eficiência na redução da acidez em camadas subsuperficiais de solos com cargas variáveis que dependem da lixiviação de sais, orgânicos ou inorgânicos, por meio do perfil do solo (CAIRES et al., 2006).

Pelo fato do gesso ser mais solúvel, ele satura com o Ca, como também com a solução do solo, ocasionando a diminuição da reação de hidrólise do calcário. Para identificar essa ação do gesso, se torna interessante analisar a lixiviação de cátions ao longo do perfil do solo. O fator que proporciona ao gesso alterar as características químicas do solo é proveniente da incrementação de quantidades de Ca e $S–SO_4^{-2}$, pelo motivo de serem os elementos mais presentes nesse produto (32,6 % de CaO e 18,7 % de S) (RAIJ, 1992).

Vários elementos químicos na solução do solo são formados quando o sulfato e o Ca se combinam com outros elementos. Essas combinações tendem a formar

complexos de um íon com outros que possuem valência oposta, consequentemente, alterando a função biológica do elemento químico, o que confirma a importância da especiação química para interpretação da disponibilidade de íons para as raízes das plantas (CHAVES et al., 1991).

O uso de calcário para aumentar o pH do solo e de gesso para melhorar a estrutura do solo e a saturação por Ca, ajudam a incrementar a produtividade. O enxofre que o gesso adiciona, complexa o Al livre, reduz a toxidez para as plantas (BOSSOLANI, 2018).

Em outras palavras, o gesso reage com o Al^{3+} ocasionando precipitação e, consequentemente, o deixando em uma forma menos tóxica ($AlSO_4^+$), ao passo que são elevados os teores de Ca^{2+} e S no subsolo. Além disso, sua ação ocorre em maior profundidade que a do calcário, pois tem a característica de se movimentar aproximadamente 150 vezes mais (ZANDONÁ et al., 2015). Assim, o gesso é considerado um condicionador de solo e pouco afeta o pH podendo compensar o efeito superficial do calcário, pois atua até no subsolo, sem a necessidade de incorporação (CAIRES et al. 2003).

Deve-se ressaltar que o gesso não neutraliza a acidez do solo e, portanto, não aumenta a capacidade de troca catiônica nos Latossolos, sendo somente uma opção de uso como condicionador do solo, uma vez que a aplicação de gesso proporciona menores valores percentuais de argila dispersa em água, gerando aumento na quantidade de agregados estáveis em água maiores do que 1 mm de diâmetro e, consequentemente, tornando o solo mais poroso (COSTA et al., 2007).

Um dos problemas relacionados ao uso do gesso encontra-se na alta capacidade de movimentação de bases trocáveis pelo perfil do solo, sendo que, dessa forma, ocorre lixiviação de Mg^{2+} para camadas mais profundas do solo, diminuindo sua disponibilidade em camadas mais superficiais (CAIRES et al., 2011). Dessa maneira, o gesso vem sendo utilizado em conjunto com o calcário ao invés de seu uso exclusivo, mas, mesmo em conjunto com o calcário, dependendo da dose utilizada, a lixiviação de bases ainda pode ocorrer.

O fato da aplicação de gesso agrícola após a correção do solo com calcário cria condições para o sistema radicular das plantas se aprofundar no perfil. Logo, o gesso mostra-se útil para aumentar a capacidade de enraizamento das plantas, pois proporciona melhores condições de solo (SOUZA et al., 2018).

A aplicação destes se apresenta como alternativa potencialmente capaz de aumentar a estabilidade da produção e a manutenção de altos índices de produtividade. Estes corretivos, além de poderem fornecer algum teor de Ca e Mg ao solo, promovem o aumento da disponibilidade de P e reduzem a de Al e Mn (SOUZA et al., 2018).

Esta ação tem sido apontada por diversos autores como fonte de nutrientes e melhoria do ambiente radicular em profundidade nos primeiros anos de cultivo, época em que a ação do calcário, por ser pouco solúvel e apresentar baixa mobilidade no solo, ainda não atingiu as camadas subsuperficiais (Caires et al., 2003). Além disso, o gesso aumentou os teores de Ca e enxofre (SO_4^{-2}) no subsolo, elevou a concentração de fósforo e reduziu a de Mg na camada superficial do solo.

Zandoná et al. (2015) apontam que o gesso agrícola elevou os teores de Ca^{2+}, redistribui o Mg^{2+} para as camadas de 10-20 e 20-40 cm e diminui os teores de Al^{3+} na camada de 20-40 cm de um Latossolo argiloso. A aplicação de calcário aumentou o pH na camada de 0-10 cm de profundidade e o pH não é alterado pela aplicação de gesso agrícola. O gesso agrícola incrementou a produtividade de grãos de milho e de soja, com resposta até a dose de 2 t ha^{-1}, com incrementos de 9,3% para o milho e 11,4 e 11,3%, respectivamente com e sem calcário, para a soja.

A melhoria das condições do solo abaixo das camadas superficiais pode ser um fator de aumento e/ou estabilidade de produtividade das culturas, especialmente quando há ocorrência de veranicos em locais que apresentam deficiência de Ca na subsuperfície do solo, associada ou não à toxidez de Al (BORGES et al., 2018). A interação entre manejo do solo e gessagem foi significativa para a densidade e a porosidade total do solo, com aumento da densidade e diminuição da porosidade no solo sob SPD em função do gesso (COSTA et al., 2007).

Desta forma, a aplicação superficial de corretivos ao solo pode reduzir a acidez e melhorar a disponibilidade de nutrientes no solo, podendo também interferir na produtividade e na acumulação de nutrientes (ZANDONÁ et al., 2015; AMARAL et al., 2017). Assim, a aplicação de calcário com antecedência ao gesso agrícola trará maiores benefícios.

O gesso pode ser considerado um condicionador do solo, principalmente quando se quer aumentar o nível de Ca, sem elevar o pH do solo. No entanto, a utilização do gesso agrícola em substituição a prática da calagem não tem sido

recomendada, além de não se ter resposta concreta quanto sua eficiência em cada região e tipo de sistema de cultivo.

2.4. Movimentação de nutrientes

O atual sistema de manejo do solo adotado nos latossolos de textura argilosa da região oeste do Paraná é o sistema plantio direto que, mesmo sendo a prática mais indicada, vem demonstrando alguns problemas. Os principais problemas causados estão relacionados à compactação do solo, de origem antrópica (BEUTLER et al., 2018), provindos do uso de implementos agrícolas combinados com a falta de rotação de culturas e/ou culturas que detenham poder de turgescência capaz de transpor camadas compactadas, deixando bioporos estáveis, reduzindo os efeitos negativos da compactação.

Além disso, existe a necessidade de se conhecer sobre a mobilidade vertical de cada nutriente no perfil do solo, principalmente pelo motivo de os fertilizantes serem aplicados superficialmente sem a incorporação em subsuperfícies. Com essa premissa, entende-se que a mobilidade dos nutrientes no perfil do solo pode afetar sua disponibilidade aos vegetais.

Compreender a movimentação desses nutrientes influenciará na escolha das técnicas mais adequadas de fertilização do solo, como épocas e doses, pois o manejo inadequado pode trazer problemas ambientais de qualidade de produção e/ou econômicos (MOURA et al., 2012).

Um dos problemas que pode ser gerado é a lixiviação de nutrientes (SOUZA et al., 2018). Podemos dizer que há uma espécie de lavagem dos nutrientes do solo, que ocorre quando existe o transporte de nutrientes no solo pela água que se infiltra (SANTOS et al., 2002).

O principal responsável pelas perdas de nutrientes é considerado o volume de água percolado. Concomitantemente a isso, a movimentação de nutrientes varia com os atributos físicos do solo, como textura, estrutura, profundidade do perfil e, principalmente, porosidade (LAWTON et al., 1978; SOUZA et al., 2018).

A textura do solo é considerada uma das suas propriedades mais estáveis, sendo um fator importante para determinar a aptidão de um solo. Isso se deve ao

fato de que influencia diretamente na quantidade de água armazenada do solo e na disponibilidade dessa água às plantas e aos microrganismos. A água pode ser encontrada no solo em três formas diferentes: água que flui pelos macroporos, a água capilar é aquela que se encontra no interior dos microporos, e a água higroscópica que está fortemente aderida às partículas do solo desse modo indisponível às plantas.

Conforme a textura do solo, mais propenso é um solo de perder nutrientes por lixiviação. Isto é, de acordo com os teores de areia, silte e argila, a capacidade de infiltração de água varia, influenciando diretamente na habilidade de adsorção de nutrientes pelas partículas do solo, pois a água que se desloca no sentido vertical acaba por levar consigo muitos nutrientes que podem atingir e até contaminar as águas subterrâneas (SCOPEL et al., 2013).

Além da textura, temos aspectos relacionados à estrutura do solo que influenciam diretamente a movimentação de nutrientes. Valores elevados de densidade caracterizam a compactação do solo, que pode constituir impedimento mecânico para o crescimento de raízes e, consequentemente, o desenvolvimento das plantas, pois pode acabar não havendo disponibilidade de água e nutrientes.

A porosidade também influencia. Os macroporos são responsáveis pela aeração do solo e pela velocidade da infiltração da água. A quantidade de macroporos influencia diretamente na quantidade de movimentação de nutrientes. Enquanto isso, os microporos são responsáveis pela retenção e armazenamento de água no solo, no qual os nutrientes também se movimentam, porém, por capilaridade.

Entre os atributos químicos que afetam a movimentação, estão a capacidade de troca de cátions (CTC), a carga do cátion e o pH. Solos com alta CTC apresentam maior capacidade de adsorção dos cátions, tornando-os menos suscetíveis à lixiviação. Com o aumento do pH, a CTC do solo se eleva e, consequentemente, os cátions disporão de maior número de cargas para adsorção (SANTOS et al., 2002).

Dentre os cátions, o K, o Ca e o Mg são os principais nutrientes encontrados saturando o complexo sortivo do solo, ao lado dos íons responsáveis pela acidez do solo (NUNES et al., 1982). A distribuição de cátions, entre a superfície das partículas coloidais e a solução do solo, é controlada por uma relação entre as atividades

desses íons. Caso um dos íons seja monovalente e o outro divalente, a relação estabelecida entre as quantidades retidas pelo solo é dependente da relação entre a atividade do íon monovalente para a raiz quadrada da atividade do íon divalente em solução (NUNES et al., 1982).

Levando em conta os aspectos químicos que influenciam a movimentação e a prática de correção do pH, é de crucial interesse compreender o movimento no perfil do solo de K, Ca e magnésio, assim como a prática da calagem e gessagem acaba por reduzir alguns elementos tóxicos das plantas, pois a saturação de Al e o movimento do enxofre também devem ser compreendidos.

2.4.1. Movimentação do potássio

Depois do nitrogênio, o potássio (K) é o nutriente mineral requerido em maior quantidade pelas espécies vegetais (SOUZA et al., 2018). A disponibilidade de K, assim como a capacidade de suprimento deste nutriente pelo solo, depende da presença de minerais primários e secundários, da aplicação de fertilizantes e da CTC do solo, além da ciclagem do nutriente pelas plantas (WERLE et al., 2008).

A CTC dos solos, que varia em função do teor de matéria orgânica, do tipo e da quantidade de argila e do pH do solo, é o principal componente que determina a maior ou menor relação K trocável / K da solução, isto é, para uma mesma quantidade de K total, haverá menos K na solução em solos com alta CTC, o que refletirá em menores perdas de K por lixiviação, menor retirada desnecessária de K pelas plantas e maior capacidade de armazenamento de K no solo (WERLE et al., 2008).

Os solos com maior capacidade para fixar K possuem, nas frações argila e/ou silte, uma assinalável percentagem de vermiculitas expansíveis (vermiculitas de baixa carga), além de pequenas percentagens de vermiculita e/ou interestratificados mica-vermiculita (PORTELA; ABREU, 2018). No entanto, a elevação dos teores de K também favorece a lixiviação (SOUZA et al., 2018), mesmo em solos mais argilosos e com alta CTC, como o que se observou no estudo de Werle et al. (2008).

Outro fator determinante na lixiviação de K^+ é o poder tampão do solo, relação entre o K^+ trocável e o K^+ em solução. O poder tampão de K^+ em solos altamente

intemperizados é considerado baixo, o que pode justificar o comportamento do K^+ no solo estudado (REZENDE, 2018).

2.4.2. Movimentação do cálcio

A correção da acidez e da falta de cálcio (Ca), ações necessárias para aumentar a produtividade dos cultivos agrícolas em solos ácidos, têm sido feita pela adição de materiais corretivos, principalmente calcários. Entretanto, como estes corretivos se solubilizam de forma lenta e são incorporados superficialmente, a correção se restringe à superfície, limitando o crescimento das raízes à camada de aplicação.

Nas situações em que o aprofundamento do sistema radicular da cultura é vantajoso, a movimentação do Ca aplicado, da superfície até camadas subsuperficiais, pode ser um fenômeno desejável (CAIRES et al., 2001). No entanto, apesar de ser um processo natural na formação dos solos, a movimentação a partir da adição do calcário é lenta e nem sempre resulta em aumentos significativos dos teores em profundidade.

Tratamentos que detiveram elevadas quantidades de Ca foram determinados onde houve a aplicação de somente gesso, seguido de gesso + calcário, evidenciando a solubilidade deste material no solo. Não houve lixiviação do Ca adicionado via calcário, pois, nestes tratamentos, as quantidades determinadas foram iguais da testemunha. As quantidades perdidas nos percolados confirmam que, realmente, pouco Ca foi solubilizado e perdido por lixiviação nesses tratamentos (MARIA et al., 1993).

A maioria dos fertilizantes é adicionada ao solo na forma de sais. Ao ingressarem no sistema, eles alteram a composição da solução e, com isso, promovem modificações nos equilíbrios químicos entre as fases sólida e líquida (WADT e WADT, 1999). Assim, a adição de qualquer fertilizante, mesmo nas quantidades adequadas, pode afetar, temporariamente, a disponibilidade e a movimentação de outros nutrientes.

2.4.3. Movimentação de magnésio

Os íons Mg^{2+} são retidos pelos coloides do solo com menor energia que os íons Ca^{2+}. As perdas de Mg por lixiviação dependem de vários fatores como: permeabilidade do solo, CTC, teores de Mg trocável e solúvel, pH, adubações que baixam o pH e uso de adubos que contêm elementos que deslocam o Mg (MELLO et al., 1983).

Com a utilização de gesso, as reações que ocorrem no solo, principalmente a lixiviação de Ca e de outras bases, é acelerada em razão da alta solubilidade desta fonte. A lixiviação, contudo, pode arrastar outras bases, como Mg e K, para fora do alcance das raízes (MARIA et al., 1993).

Estudos confirmam essa condição com a premissa de que, com a aplicação das doses de gesso agrícola, foi possível verificar que ocorreu movimentação e lixiviação de Ca e Mg no perfil do solo, além de liberação de enxofre e neutralização do Al no solo (AMARAL et al., 2017).

Maria et al. (1993) advertem que os tratamentos com gesso apresentaram elevadas perdas por lixiviação, em uma situação muito semelhante ao Ca. Verificaram ainda que o gesso promoveu mais perdas, sendo este Mg proveniente do solo, visto que não foi adicionada no tratamento gesso nenhuma fonte deste cátion. Portanto, a aplicação de gesso sozinho pode levar a uma perda de Mg para camadas mais profundas do solo, tornando-se um problema se colocar o elemento fora do alcance das raízes.

2.4.4. Saturação por alumínio

Os estudos de Santos et al. (2002) sugerem que o manejo do fertilizante potássico influenciou na saturação por Al somente na camada superficial do solo, obtendo-se menor valor quando se efetuou o parcelamento da maior dosagem de K. Além disso, em todas as condições do estudo, a saturação por Al decresceu sensivelmente com o aumento da profundidade.

Na inundação contínua, ocorre maior lixiviação de Ca e de K, teor de fósforo no solo e saturação por Al e menor pH na camada superficial do solo em relação à

inundação intermitente, além de aumento do teor de K e do pH e diminuição de saturação por Al em profundidade (SANTOS et al., 2002).

Já Maria et al. (1993) verificaram em seus estudos que, em ambos os solos estudados, o gesso promoveu as maiores perdas de Al, seguido do gesso + calcário, sendo as diferenças mais acentuadas na primeira e segunda percolação.

Portanto, dentre as possíveis técnicas de manejo a serem aplicadas, a gessagem tem sido uma das melhores alternativas para neutralizar a toxicidade de Al na camada subsuperficial do solo (AMARAL et al., 2017). Por conta desse comportamento do gesso agrícola, possivelmente a não existência de impedimentos químicos como o Al no solo pode ter contribuído para o desenvolvimento uniforme da cultura (AMARAL et al., 2017).

Amaral et al. (2017) esclarecem que o Al trocável na camada arável e no subsolo foi neutralizado pela formação de um par iônico com o SO_4^{-2} proveniente do gesso. Com a eliminação de impedimentos químicos do ambiente de exploração radicular, as raízes apresentaram maior área no solo de absorção de água e nutrientes, os quais podem ser convertidos em aumento de produtividade. Logo, o ânion bicarbonato seria responsável, também, pela neutralização do Al na camada subjacente.

2.5. Análise da movimentação de nutrientes.

A grande preocupação com a qualidade do solo em compreender os processos de degradação e possíveis impactos ambientais, torna interessante o estudo de problemas envolvendo fluxo e transporte de solutos em solo não saturado. Quantidades substanciais de fertilizantes, pesticidas e outros produtos químicos são utilizadas atualmente e, em sua maioria, os efeitos são benéficos apenas à parte superior do perfil do solo (BORGES JUNIOR et al., 2006). O transporte desses produtos químicos para o subsolo torna-os não somente indisponíveis para às plantas, mas impõe uma ameaça à qualidade da água subterrânea e das camadas subsuperficiais.

A preocupação com o destino de determinados produtos químicos aplicados no solo tem motivado vários pesquisadores a desenvolver modelos teóricos,

objetivando descrever os processos físicos relacionados com o transporte desses produtos no perfil do solo (BORGES JUNIOR et al., 2006).

Tal preocupação é recente, Coelho (2016) confirma essa premissa afirmando que os estudos para a compreensão de princípios físicos e químicos que regem o transporte de água e soluto no solo, especialmente na chamada zona vadosa (localizada entre a superfície do solo e o lençol freático), têm avançado somente a partir da década de 60.

Grande quantidade de trabalhos internacionais já foram concretizados em termos de desenvolvimento teórico, validação experimental e implementação numérica, acarretando em resoluções de equações analíticas e numéricas em longo prazo (PIZARRO, 2009; COELHO, 2016).

A maioria dos estudos é realizada em laboratório em colunas de solo. Estudos em campo são ainda bastante escassos e com deficiências nos métodos experimentais disponíveis, pois o que se observa é que existe grande dificuldade em envolver todos os parâmetros pertinentes ao ambiente, necessários à simulação do problema que se está desenvolvendo (PIZARRO, 2009).

Espera-se ser possível prever os riscos de poluição e contaminação e os impactos que determinado soluto pode causar no sistema solo-água, a partir do conhecimento de suas propriedades, da sua interação com o meio, de sua movimentação e persistência no solo (PIZARRO, 2009).

O transporte de solutos provém de uma teoria na qual se acredita que o deslocamento de fluidos miscíveis é um processo que acontece quando um fluido se mistura a outro, deslocando-se no perfil do solo. A lixiviação de nutrientes é um exemplo de deslocamento miscível. Entre os pesquisadores, há um consenso de que o método mais adequado para estimar os parâmetros do transporte de solutos é o ajustamento dos modelos teóricos a dados experimentais de laboratório e de campo (JUNIOR et al., 2006; COELHO, 2016).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e descrição da área de estudo

O experimento foi desenvolvido na Estação Experimental do Instituto Agronômico do Paraná – IAPAR, polo regional de Santa Tereza do Oeste, Paraná.

O relevo local é suavemente ondulado com declividade média de 2%. O solo da área experimental é classificado em Latossolo Vermelho Distroférrico típico (LVdf) de textura argilosa (EMBRAPA, 2018). Na Tabela 1, apresenta-se a análise granulométrica do solo do local do experimento.

Tabela 1. Composição granulométrica do solo nas camadas de 0-0,1, 0-1-0-2 e 0,2-0,3 m da área experimental do IAPAR/Santa Tereza (valores médios de 3 repetições).

Camada (m)	Granulometria		
	Areia	Argila	Silte
	----------g kg^{-1}----------		
0,0-0,1	44,9	561,1	394,1
0,1-0,2	38,7	641,9	319,4
0,2-0,3	24,7	706,2	269,1
Média	36,1	636,4	327,5

[1] Método da pipeta, conforme USDA-Soil Conservation Service. Soil Survey Investigations Report n.1. Whashington, 1972. 63p.

A região apresenta coordenadas geográficas: longitude W 53 º 29 ’37’’ e latitude S 24º 50 ’42’’, altitude de 750 metros. A caracterização climática da região, segundo a classificação de Koppen, é mesotérmico subtropical úmido, com precipitação média anual de 1840 mm e umidade relativa do ar entre 75 a 80% (IAPAR, 2000). Os dados sobre a precipitação pluviométrica e temperatura de outubro a fevereiro nos anos de 2017 e 2018, são apresentados na Figura 1.

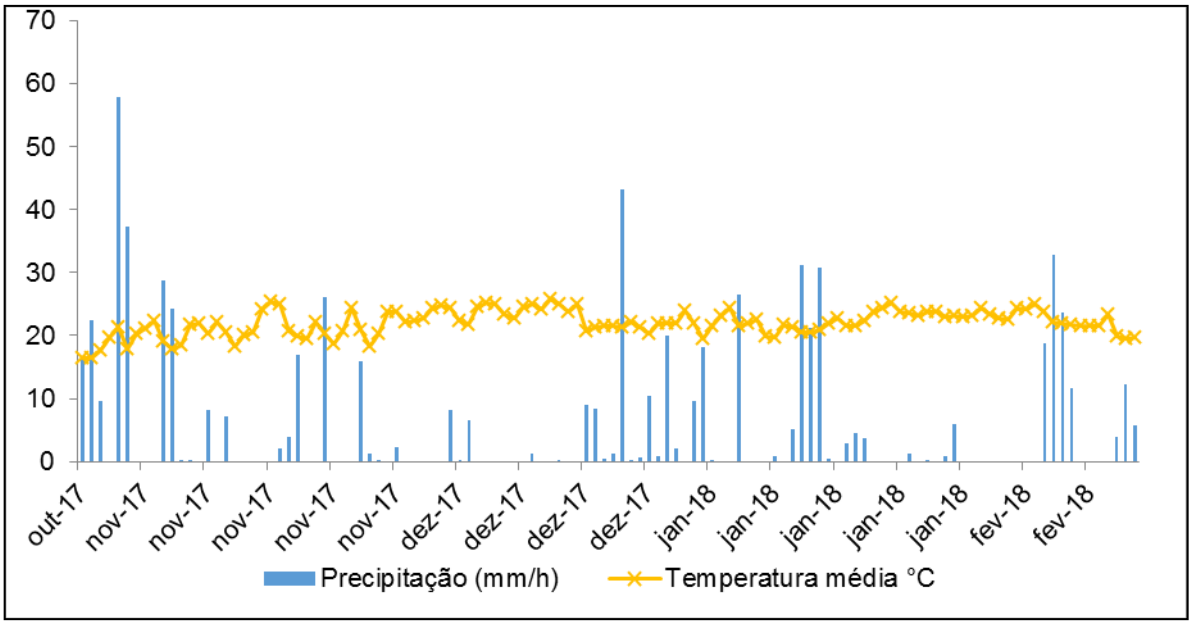

Figura 1. Precipitação pluviométrica e temperatura média da cultura da soja no período de outubro a fevereiro nos anos de 2017 e 2018.

3.2. Delineamento experimental e descrição dos tratamentos

O experimento foi estabelecido em delineamento inteiramente casualizado (DIC) cultivo em faixas, envolvendo a aplicação isolada e combinada de gesso e calcário sob níveis de compactação.

Os estados de compactação foram estabelecidos pelo número de passadas de um rolo compactador (0, 1, 3 e 5 passadas), com o intuito de investigar como ocorre a movimentação de nutrientes em diferentes estados estruturais. O rolo compactador utilizado foi o BOMAG BW 211D-40 de 16 toneladas com o dispositivo vibratório ligado.

Os tratamentos foram dispostos no sentido perpendicular à linha de tráfego do rolo compactador. Na Figura 2, encontra-se o croqui representativo da disposição dos tratamentos envolvendo estados de compactação e aplicações de calcário e gesso agrícola. Foram aplicadas doses que levam em consideração as indicações de correção e manutenção da fertilidade do solo (EMBRAPA, 2000).

Elevou-se a saturação de bases a 80% para fins de cálculo da necessidade de calcário, já para o cálculo da necessidade de gesso agrícola seguiu-se a recomendação da Embrapa a qual preconiza 50Kg $há^{-1}$ a cada 1% de argila (60% argila x 50Kgha^{-1} = 3 t ha^{-1}).

- T1 sem aplicação de calcário e gesso (testemunha);
- T2 calcário - 4,7 t ha^{-1};
- T3 gesso - 3 t ha^{-1};
- T4 calcário + gesso (4,7 + 3,0 t ha^{-1}, respectivamente).

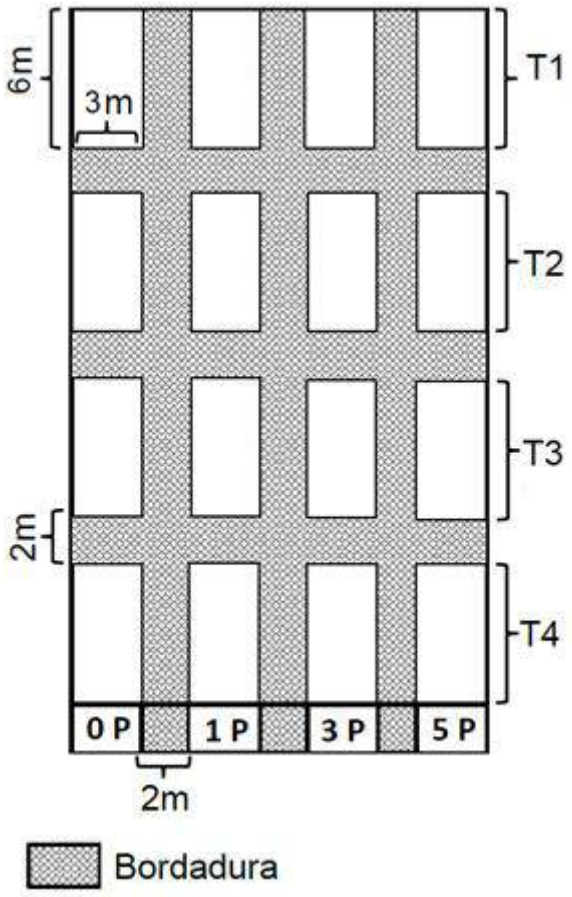

Figura 2. Disposição dos tratamentos envolvendo estados de compactação (0, 1, 3 e 5 passadas do rolo compactador) e aplicações de calcário e gesso agrícola.

O tamanho de cada parcela foi definido como 3 metros de largura por 6 de comprimento.

O estudo foi desenvolvido na safra 2017/2018, em sistema plantio direto, com a cultura de soja sobre a palhada de aveia. A continuação do experimento após os resquícios da cultura da soja se deu pela implantação novamente da cultura da aveia.

3.3. Condução da cultura estudada

No início de outubro de 2017, foi realizada a implantação do experimento com o estabelecimento dos níveis de compactação do solo, com zero, uma, três e cinco passadas. A umidade do solo neste dia estava em 38,43% na camada de 0,0 – 0,1 m, e de 37,19% na camada de 0,1 – 0,2 m.

Em meados de outubro de 2017, foram realizadas as aplicações de gesso e calcário agrícola conforme o croqui.

As coletas de solo para caracterização/monitoramento químico do solo foram realizadas durante um ano, em um intervalo de três meses cada. A primeira coleta referente ao início do experimento foi realizada no momento da implantação da cultura, a próxima aos três, seguida dos seis, nove e doze meses.

As coletas físicas foram realizadas em dois períodos. No início da implementação da cultura da soja, mês de novembro de 2017, e após a colheita, em março de 2018.

A cultura utilizada foi uma soja comercial denominada cultivar IPR-61, semeada em novembro de 2017 sobre restos da cultura da aveia preta. O plantio da soja em cada parcela se deu em nove linhas de 6 m com espaçamento 0,45 m entre linhas.

Adubações e tratos culturais seguiram as recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil, em relação ao manejo de fungicidas, herbicidas, inseticidas e pesticidas (EMBRAPA, 2000).

A colheita da safra da soja, com intuito de analisar os componentes produtivos, foi efetivada no início de março de 2018. Realizou-se o corte da planta rente ao solo e, posteriormente, trilhado em uma colheitadeira a fim de minimizar perdas.

Após a soja, novamente a cultura da aveia preta foi implementada.

3.4. Avaliações e determinações químicas, físicas e de produtividade de grãos

Para a realização das análises químicas, coletaram-se amostras parcialmente deformadas de solo em cada unidade experimental, em duplicadas e em quatro camadas de solo, totalizando 128 amostras por período coletado. Foram abertas trincheiras de 0,4 m de profundidade com o auxílio de cavadeiras. O solo foi coletado na região intermediária de cada camada (0,0 – 0,05; 0,05 – 0,1; 0,1 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m).

Em seguida, as amostras foram levadas ao Laboratório de Física do solo-LAFIS, da Unioeste, secadas ao ar, peneiradas e, posteriormente, levadas ao IAPAR para análises químicas dos elementos químicos Ca, Mg, K, pH e a saturação por Al. Os métodos para obtenção das análises químicas foram realizados conforme metodologia preconizada pela EMBRAPA (2009). Os dados da concentração de Ca, Mg, K e saturação por Al foram estimados em $cmol_c/dm^3$ e os dados de pH em $CaCl_2$ (variando a neutralidade em 4,9 – 5,9).

Para a quantificação das análises físicas (densidade, porosidade total, microporosidade, macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado - Ksat), foram abertas trincheiras em cada unidade experimental e coletadas amostras indeformadas em triplicata com anéis volumétricos de aço inox com volume de aproximadamente 98 cm^3 (5 cm de diâmetro e 5 cm de altura), em três camadas do solo (0,0 - 0,1; 0,1 - 0,2 e 0,2 - 0,3 m de profundidade), com auxílio de martelo pedológico e extrator de solo, totalizando 144 amostras por período coletado.

Em seguida, as amostras foram colocadas em latas de Al e encaminhadas para o LAFIS. As amostras foram limpas, organizadas e colocadas em saturação em água por 24 horas em uma bandeja. Após esse período, foi determinada a condutividade hidráulica do solo saturado – Ksat, por meio de um permeâmetro de carga constante. Os cálculos para obtenção da condutividade hidráulica do solo foram realizados conforme metodologia preconizada por EMBRAPA (1997).

Posterior à determinação da Ksat, as amostras saturadas foram pesadas e alocadas em coluna de areia a 0,6 m.c.a (metros de coluna de água), na qual permaneceram por 48 horas drenando a água contida nos macroporos. Em seguida,

as amostras foram alocadas em estufa a 105 ºC por 48 horas para extração da água contida nos microporos.

Para calcular a densidade do solo foi utilizada a seguinte equação:

$$\mathrm{Ds} = \frac{\mathrm{MSS}}{\mathrm{VT}}$$

Em que

Ds: densidade do solo (Mg m^{-3});

MSS: massa da amostra de solo seco a 105 ºC;

VT: volume total do anel (%).

Para calcular a macroporosidade, foi utilizada a seguinte equação:

$$\mathrm{Macro} = \mathrm{PT} - \mathrm{Micro}$$

Em que:

Macro: macroporosidade do solo (%);

PT: porosidade total (%);

Micro: microporosidade (%).

Para calcular a porosidade total, foi utilizada a seguinte equação:

$$\mathrm{PT} = \frac{(1 - \mathrm{Ds})}{\mathrm{Dp}} \times 100$$

Em que:

Pt: porosidade total (%);

Ds: densidade do solo (Mg m^{-3});

Dp: densidade de partículas (Mg m^{-3}).

Para calcular a microporosidade, foi utilizada a seguinte equação:

$$\mathrm{Micro} = \frac{(\mathrm{MSU} - \mathrm{MSS})}{\mathrm{MSS}} \times 100$$

Em que:

Micro: microporosidade (%);

MSU: massa de solo após a tensão de 0,6 m.c.a;

MSS: massa de solo seco (Mg).

Foram coletadas amostras de cada parcela em triplicatas em cada parcela de 0,5x6 m. Em seguida, foram levadas ao LAFIS, secadas em estufa, medida a umidade, massa de 100 grãos e rendimento. A massa de cem grãos foi determinada em balança de precisão de 0,01 g, com teor de água dos grãos corrigido para 13% (base úmida), sendo realizado pela média de três repetições por unidade experimental. Os procedimentos de altura de plantas, número de plantas, rendimento de grãos e peso de cem grãos da cultura da soja foram analisados segundo RAS (2009).

3.5. Grau de compactação do solo

O grau de compactação (GC) relaciona a densidade do solo (Ds) atingida por meio do teste de compactação do solo no laboratório (BD_C), como segue:

$$\mathrm{GC} = \frac{\mathrm{Ds}}{\mathrm{D_c}} \times 100$$

A Ds pode ser estimada pela estratégia que considera uma faixa de água menos limitante (LLWR) (SILVA et al., 1994). O intervalo de água menos limitante é um índice baseado na densidade do solo, que considera a faixa de umidade do solo sendo que nenhuma limitação para o crescimento da planta é esperada quando se considera aeração do solo, resistência à penetração e disponibilidade de água na planta.

Os valores críticos considerados para obter o IHO foram a água, o conteúdo na capacidade de campo (tensão matricial de 0,01 MPa), ponto de murcha permanente (tensão matricial de 1.5 MPa), água contida quando a resistência à penetração do solo é igual a 2 MPa e o teor de água quando a porosidade cheia de ar é de 0,10 m^3m^{-3}. O valor da densidade crítica do solo (D_c) foi estimado usando a equação: $\mathrm{D_C} = -0{,}00078 * (\%\ \mathrm{argila}) + 1{,}83803$ (REICHERT et al., 2009). Na Tabela 2, é possível verificar o grau de compactação gerado em cada camada e em cada nível de compactação.

Tabela 2. Grau de compactação (GC) obtido a partir da relação entre densidade do solo (DS) e a densidade crítica estabelecida pelo intervalo hídrico ótimo (IHO).

Grau de compactação			
Camada	Nível	DS (Mg m^{-3})	GC (%)
0-0,10 m	0P	1,07	56,82
	1P	1,11	59,08
	3P	1,16	61,62
	5P	1,19	63,35
0,10 - 0,20 m	0P	1,05	55,57
	1P	1,14	60,56
	3P	1,17	62,14
	5P	1,19	63,01
0,20 - 0,30 m	0P	1,06	56,07
	1P	1,09	57,81
	3P	1,17	61,64
	5P	1,19	63,04

3.6. Análise estatística dos dados

Os resultados das análises químicas, físicas e de rendimento de grãos de soja foram analisados por meio de estatística descritiva, calculando média, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose.

Os dados foram submetidos à análise de variância ANOVA, realizando a comparação das médias pelo teste de Tukey a 5 % de significância pelos programas *software* RStudio e Sisvar 5.6.

3.7. Movimentação de nutrientes no perfil do solo

O método matemático adotado para descrever a movimentação de nutrientes no perfil do solo ao longo do tempo baseou-se no ajuste de um modelo de característica polinomial pelo Método dos Mínimos Quadrados. Este modelo foi empregado para indicar a movimentação dos nutrientes no decorrer dos meses, cujos dados foram coletados, a fim de considerar a análise desde efeito isolado em um específico parâmetro.

Em seguida, o modelo pode ser utilizado para a investigação da contribuição de seus parâmetros, sendo que a sua função define o comportamento ao longo do

tempo de camada a camada. Assim, a função movimentação de nutrientes possui varáveis independentes, uma delas sendo o tempo e a outra, em particular, o parâmetro analisado. Para a realização do ajuste, utilizou-se como base a referência de Barroso (1987).

Por definição, temos que ajuste de curvas é o procedimento matemático que consiste em se determinar, a partir de uma série de pontos representativos das variáveis que compõem um determinado fenômeno, uma curva que o expresse matematicamente. A curva obtida deve permitir com satisfatória segurança a realização de análises e projeções sobre o fenômeno em questão.

A maneira a partir da qual determinamos o ajuste de mínimos quadrados por um polinômio pode ser imediatamente generalizada para o caso da combinação linear de um conjunto de funções conhecidas $\{\varphi i(x)\}i$. Podemos verificar prontamente que o polinômio $p(x) = a_0 + a_1x + ... + a_mx^m$ é um caso particular da combinação linear de m distintas funções $\varphi i(x)$

$$\varphi(x) = \sum_{j=1}^{m} a_j \varphi_j(x)$$

no caso em que $\varphi i(x) = x^j$.

A soma quadrática dos resíduos $Q(f, \varphi)$ é dada por

$$Q = (f, \varphi) = \sum_{i=1}^{n} (f_i - \varphi(x_i))^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(f_i - \sum_{j=1}^{m} a_j \varphi_j(x) \right)^2$$

De maneira análoga ao caso do ajuste para polinômios, o conjunto de coeficientes que minimizam $Q(f, \varphi)$ é determinado pela solução do sistema de equações lineares

$$\begin{cases} \dfrac{\partial Q}{\partial a_o} = 0 \\ \dfrac{\partial Q}{\partial a_1} = 0 \\ \vdots \\ \dfrac{\partial Q}{\partial a_m} = 0 \end{cases}$$

que é equivalente ao sistema de equações normais

$$\Phi^T \Phi a = \Phi^T f$$

onde

$$\Phi = \begin{pmatrix} \varphi_1(x_1) & \varphi_2(x_1) & \cdots & \varphi_m(x_1) \\ \varphi_1(x_2) & \varphi_2(x_2) & & \varphi_m(x_2) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \varphi_1(x_n) & \varphi_2(x_n) & \cdots & \varphi_m(x_n) \end{pmatrix}_{n \times m}$$

$$a = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} \text{ e } f = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix}$$

O ajuste matemático aos dados, $[C(t) = a * t^4 + b * t^3 + c * t^2 + d * t + e]$ (Equação 1) foi empregado para indicar a movimentação de cada nutriente no transcorrer do tempo, sem considerar a análise do efeito isolado de um específico parâmetro.

No entanto, o ajuste pode ser utilizado para investigar tal contribuição se seus parâmetros (a, b, c, d, e) forem ajustados aos dados por meio de uma lei de potências como:

$$\begin{cases} a = q_1 * z^3 + q_2 * z^2 + q_3 * z + q_4 \\ b = q_5 * z^3 + q_6 * z^2 + q_7 * z + q_8 \\ c = q_9 * z^3 + q_{10} * z^2 + q_{11} * z + q_{12} \\ d = q_{13} * z^3 + q_{14} * z^2 + q_{15} * z + q_{16} \\ e = q_{17} * z^3 + q_{18} * z^2 + q_{19} * z + q_{20} \end{cases}$$

Em que z representa o parâmetro cuja eventual influência está no processo de movimentação de nutrientes ao longo do perfil do solo. Assim sendo, a função de movimentação possui duas variáveis independentes, uma delas sendo o tempo e outra a particular profundidade analisada. Ela é escrita como:

$$\begin{aligned} [C(t,z) = {} & (q_1 * z^3 + q_2 * z^2 + q_3 * z + q_4) * t^4 + (q_5 * z^3 + q_6 * z^2 + q_7 * z + q_8) * t^3 \\ & + (q_9 * z^3 + q_{10} * z^2 + q_{11} * z + q_{12}) * t^2 + (q_{13} * z^3 + q_{14} * z^2 + q_{15} * z \\ & + q_{16}) * t + (e = q_{17} * z^3 + q_{18} * z^2 + q_{19} * z + q_{20})] \end{aligned}$$

Em que $C(t,z)$ é a concentração dos nutrientes em ($cmol_c$ /dm^3) ao longo do tempo, t, em meses e q_1; q_2; q_3; ...; q_{20} são parâmetros de ajuste obtidos pelo método de Gauss-Newton e pelo algoritmo de Luvenberg-Marquardt por meio do programa computacional STATISTICA® 10.0 (STATSOFT, 2011).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estatística descritiva e ANOVA: aspectos físicos do solo

A análise descritiva por meio de interações das médias dos níveis de compactação nas camadas se encontra a seguir, com os atributos físicos Densidade do Solo (DS), Porosidade Total (PT), Macroporosidade (MACRO) e Microporosidade (MICRO), dos anos de 2017 (Figura 3) e de 2018 (Figura 4). Como o atributo físico-hídrico Ksat possui grande variabilidade, o seu diagrama não foi realizado.

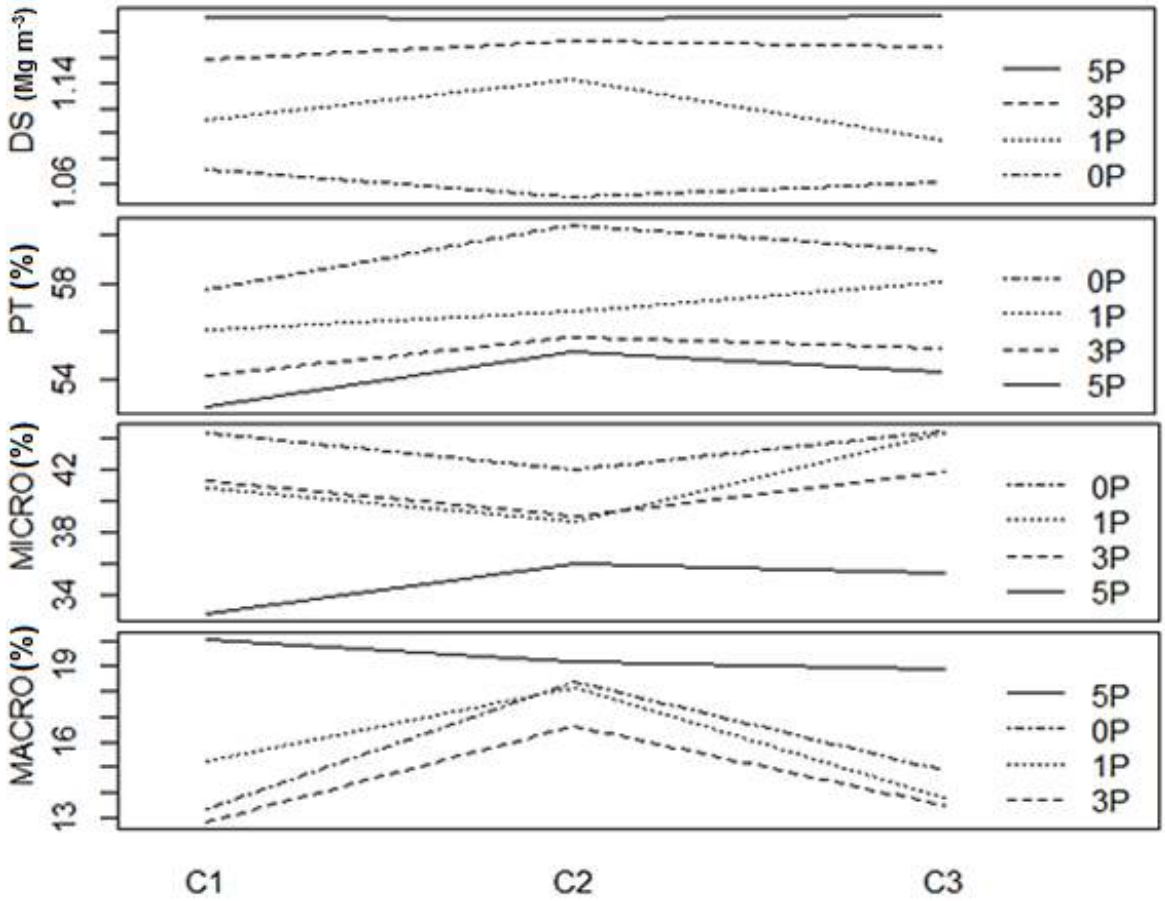

Figura 3. Diagrama da interação média de DS, PT, MACRO, MICRO nos níveis de compactação do ano de 2017 (0P-testemunha; 1P-1passada; 3P-3 passadas e; 5P-5 passadas do rolo compactador) entre as camadas (C1: 0,0-0,1m; C2: 0,1-0,2m; C3: 0,2-0,3m).

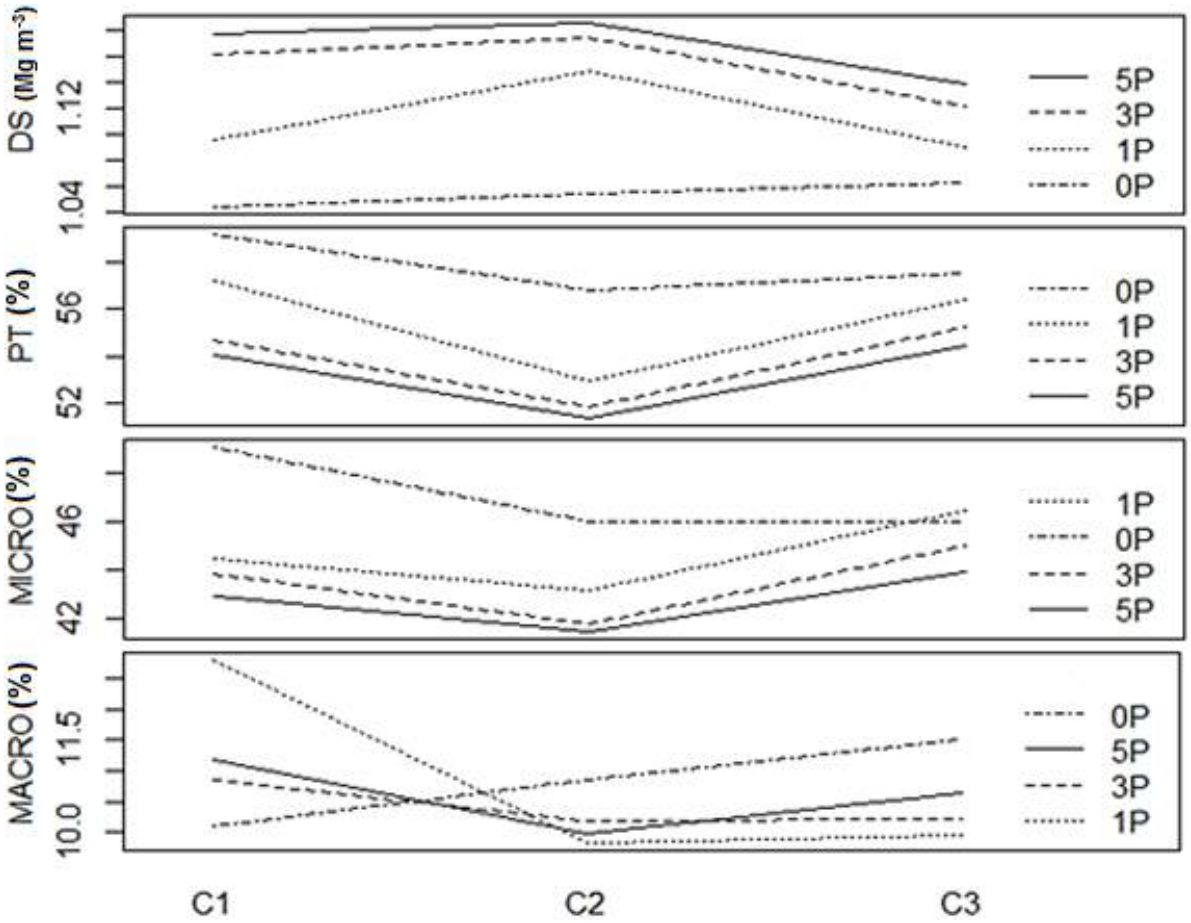

Figura 4. Diagrama da interação média de DS, PT, MACRO, MICRO nos níveis de compactação do ano de 2018 (0P-testemunha; 1P-1passada; 3P-3 passadas e; 5P-5 passadas do rolo compactador) entre as camadas (C1: 0,0-0,1m; C2: 0,1-0,2m; C3: 0,2-0,3m).

Ambos os diagramas demonstram que a compactação é um fator que influencia negativamente a DS, a PT, a MACRO e a MICRO. A interpretação da interação é entendida como quanto mais não paralelas são as linhas, maior é a força de interação.

Assim, em todos os diagramas é possível identificar que a camada que mais apresentou variação entre os valores máximos e mínimos foi a C2 (camada de 0,1-0,2 m), a qual é a camada que mais sofre os efeitos da compactação em lavouras manejadas sob sistema plantio direto.

Conforme testes que validaram os pressupostos de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e de homogeneidade pelo teste de Barlett, realizou-se à ANOVA. A análise de variância dos atributos físicos levou em consideração os níveis de compactação em cada camada, desconsiderando as aplicações combinadas de calcário/gesso. Tal tratamento foi desconsiderado na análise dos atributos físicos do solo, pois não geram alterações no estado estrutural do solo.

Os valores médios da densidade do solo, condutividade hidráulica do solo saturado, macroporosidade, microporosidade e porosidade total nas camadas amostradas de 0 - 0,1; 0,1 - 0,2 e 0,2 - 0,3 metros são apresentados nas Tabelas 3 (ano 2017) e 4 (ano 2018).

Tabela 3. Valores médios dos atributos físicos do solo do ano de 2017 nas três camadas, quatro níveis de compactação (média de 12 repetições).

Tratamentos	DS	Espaço poroso do solo (%)			Ksat
	(Mg m^{-3})	PT	Micro	Macro	(mm h^{-1})
Camada 0-0,1 m					
0P	1,07 c	57,74 a	44,37 a	13,37 a	82,96 A
1P	1,11 bc	56,06 ab	40,82 b	15,24 a	69,98 Ab
3P	1,16 ab	54,17 bc	41,30 b	12,89 a	28,43 Ab
5P	1,19 a	52,88 c	42,84 b	10,04 b	21,25 B
Camada 0,1-0,2 m					
0P	1,05 b	60,40 a	36,66 ab	18,41 a	252,54 A
1P	1,14 a	56,85 b	32,14 a	18,14 a	66,64 B
3P	1,17 a	55,73 b	32,58 a	16,66 a	33,35 B
5P	1,19 a	55,11 b	39,49 b	9,14 b	40,91 B
Camada 0,2-0,3 m					
0P	1,06 b	59,33 a	44,42 ab	14,91 a	184,97 A
1P	1,09 b	58,07 a	44,30 b	13,77 a	112,95 Ab
3P	1,17 a	55,29 b	41,79 b	13,49 a	42,39 Ab
5P	1,19 a	54,27 b	45,40 a	8,87 b	69,25 B

Médias de tratamentos seguidas por letras distintas na coluna diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 5% de significância.

Considerando o atributo físico Densidade do Solo (DS) verifica-se que os valores encontrados variam diretamente com o número de passadas do rolo compactador. Os menores valores de DS ocorreram no tratamento que não recebeu compactação, ou seja, em 0P nas três camadas analisadas. Em contrapartida, os maiores valores de DS foram obtidos nos níveis de compactação 3P e 5P que foram próximos do intervalo crítico de 1,25 a 1,30 Mg m^{-3} para solos de textura muito argilosa (REICHERT, REINERT, BRAINA, 2003).

Salientam-se os dados das camadas 0,1 - 0,2 m e 0,2 – 0,3 m que também obtiveram valores altos de DS, confirmando a premissa de que tais camadas também sofrem deformações com o tráfego de máquinas e implementos agrícolas. Como consequência negativa da compactação, a qualidade estrutural do solo pode

ficar comprometida, com alterações negativas na Porosidade Total, Macroporosidade e Microporosidade (LANA et al., 2017; LIMA et al., 2017; VISCHI FILHO et al., 2017).

Em solos argilosos, tendo em vista as partículas se organizarem em unidades estruturais porosas, ocorre a formação de agregados com porosidade entre e dentro dos agregados (BRADY; WEIL, 2013).

Como consequência da alta densidade, temos uma baixa porosidade total, sendo relações inversas como apresenta Secco (2005). Nesse sentido, elevados valores de PT foram encontrados no tratamento que não recebeu compactação, assim como os menores valores ocorreram conforme o aumento da densidade.

A Condutividade do Solo Saturado (Ksat) apresentou maiores valores quando não ocorreu a compactação do solo, embora não estejam necessariamente associados aos valores de macroporosidade do solo. Possivelmente, a presença de bioporos estáveis tenha contribuído para a ocorrência destes valores.

Tabela 4. Valores médios dos atributos físicos do solo do ano de 2018 nas três camadas avaliadas e nos quatro níveis de compactação (média de 12 repetições).

Tratamentos	Ds	Espaço poroso do solo (%)			Ksat
	(Mg m^{-3})	PT	Micro	Macro	(mm h^{-1})
Camada 0-0,1 m					
0P	1,05 b	59,17 a	49,07 a	10,10	18,76
1P	1,10 b	57,22 a	44,41 ab	12,80	26,77
3P	1,16 a	54,66 b	43,79 b	10,86	4,88
5P	1,18 a	54,06 b	42,86 b	11,19	8,27
Camada 0,1-0,2 m					
0P	1,05 b	56,85 a	46,02 a	10,84	18,98
1P	1,15 a	53,45 b	43,09 ab	9,84	9,29
3P	1,17 a	51,90 b	41,71 b	10,19	6,45
5P	1,19 a	51,42 b	41,45 b	9,97	23,62
Camada 0,2-0,3 m					
0P	1,06 b	57,51 a	46,00 a	11,51	38,87
1P	1,09 ab	56,40 ab	46,47 a	9,94	48,08
3P	1,12 ab	55,23 ab	45,20 a	10,03	33,67
5P	1,14 a	54,50 b	43,87 b	10,63	42,77

Médias de tratamentos seguidas por letras distintas na coluna diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 5% de significância.

Na Tabela 4, apresentam-se os dados dos atributos físicos do ano de 2018, coletados após o ciclo da cultura da soja. Verifica-se melhora da qualidade estrutural do solo, por meio da redução da densidade em camadas compactadas com um aumento da porosidade total, macro e microporosidade de todas elas.

São ressaltados os dados da camada 0,1-0,2 m da Tabela 4, os quais não sofreram mudanças significativas em relação aos dados da mesma camada do ano de 2017 (Tabela 3). Sustentando a premissa que esta camada é a que mais sofre os efeitos da compactação.

Os dados da Ksat sofreram diminuição comparando 2017 e 2018, respectivamente. Contudo, não podemos nos apoiar no fato de que a cultura da soja dificultou a condutividade hidráulica do solo saturado, pois a Ksat não é um bom indicador da qualidade física de um solo, pois ela depende de inúmeras características do solo (FIGUEIREDO, 2010).

Em ambas as Tabelas, 3 e 4, os dados de microporosidade e macroporosidade foram matematicamente semelhantes para cada quesito. Alguns dos valores de macroporosidade encontrados nos tratamentos em que houve compactação estão abaixo de 10%, adentrado um ambiente crítico, influenciando negativamente na drenagem, aeração do solo e absorção de água e nutrientes (BEUTLER; CENTURION, 2003).

4.2. Movimentação de nutrientes no perfil do solo

A Figura 5 apresenta os ajustes do modelo aos dados experimentais de um determinado nutriente (Foi utilizado o potássio- K como exemplo) em relação à movimentação de nutrientes ao longo do tempo.

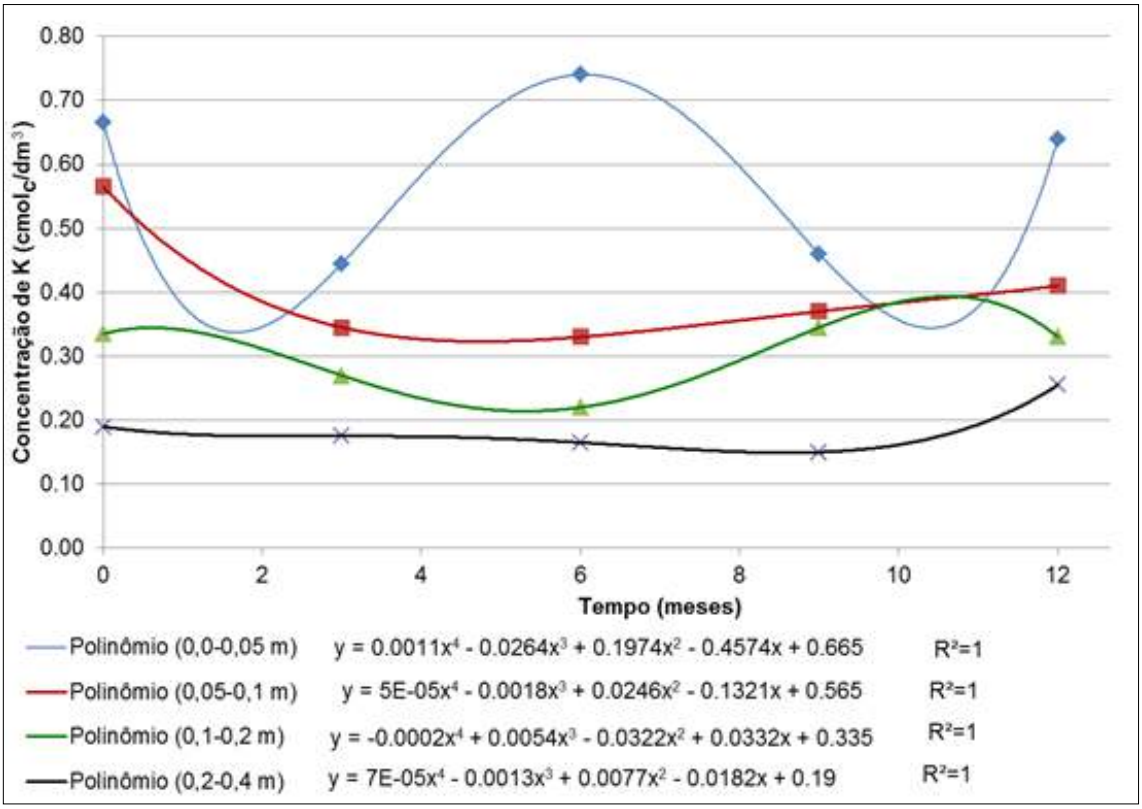

Figura 5. Ajustes do modelo matemático aos dados experimentais médios da concentração de potássio (K) ao longo dos meses coletados (0, 3, 6, 9 e 12 meses).

A Tabela 5 resume os coeficientes de ajuste, a e b, e de determinação, R^2.

Tabela 5. Ajustes dos parâmetros de cada profundidade em relação ao tempo.

Equação	Parâmetros	Profundidades			
		0,0 – 0,5dm	0,5 – 1,0dm	1,0 – 2,0dm	2,0 – 4,0dm
$C(t) = a * t^4 + b * t^3 + c * t^2 + d * t + e$	a	0,00109	0,00005	-0,00024	0,00007
	b	-0,0264	-0,00181	0,00539	-0,00131
	c	0,19738	0,02456	-0,03225	0,00771
	d	-0,45736	-0,13208	0,03319	-0,01819
	e	0,665	0,565	0,335	0,19
Coeficiente de Determinação – (R^2)		1	1	1	1

No estudo da movimentação de nutrientes no perfil do solo, foi realizado novo ajuste dos parâmetros da Equação 1 aos dados da Tabela 5. A Tabela 6 apresenta os resultados do novo ajuste dos parâmetros da Equação 1 em função da profundidade.

Tabela 6. Ajuste dos ajustes (Tabela 5) considerando a profundidade.

	q_1	q_2	q_3	q_4	R^2
a	-0,40e-3	0,0023	-0,004	0,002	1
b	0,00924	-0,055	0,0964	-0,047	1
c	-0,06197	0,3708	-0,666	0,3417	1
d	0,084	-0,554	1,1365	-0,708	1
e	0,06497	-0,248	-0,005	0,6807	1

Com os novos parâmetros, a Equação 1 pôde ser reescrita como na Equação 2.

$$C(t) = \left[[(-0{,}40e-3) * (z^3) + (0{,}002346) * (z^2) + (-0{,}0041) * z + (0{,}001976)] * t^4\right]$$
$$+\left[[(0{,}009241) * (z^3) + (-0{,}05477) * (z^2) + (0{,}096438) * z + (-0{,}04723)] * t^3\right]$$
$$+\left[[(-0{,}06197) * (z^3) + (0{,}370832) * (z^2) + (-0{,}66612) * z + (0{,}341702)] * t^2\right]$$
$$+[\,[(0{,}083999) * (z^3) + (-0{,}55416) * (z^2) + (1{,}13647) * z + (-0{,}70815)] * t]$$
$$+[(0{,}06497) * (z^3) + (-0{,}24776) * (z^2) + (-0{,}00503) * z + (0{,}680727)]$$

A partir da Equação 2, a título de exemplo, foram construídos gráficos de superfície da concentração (neste exemplo do K) em relação ao tempo e a profundidade, ilustrado na Figura 6.

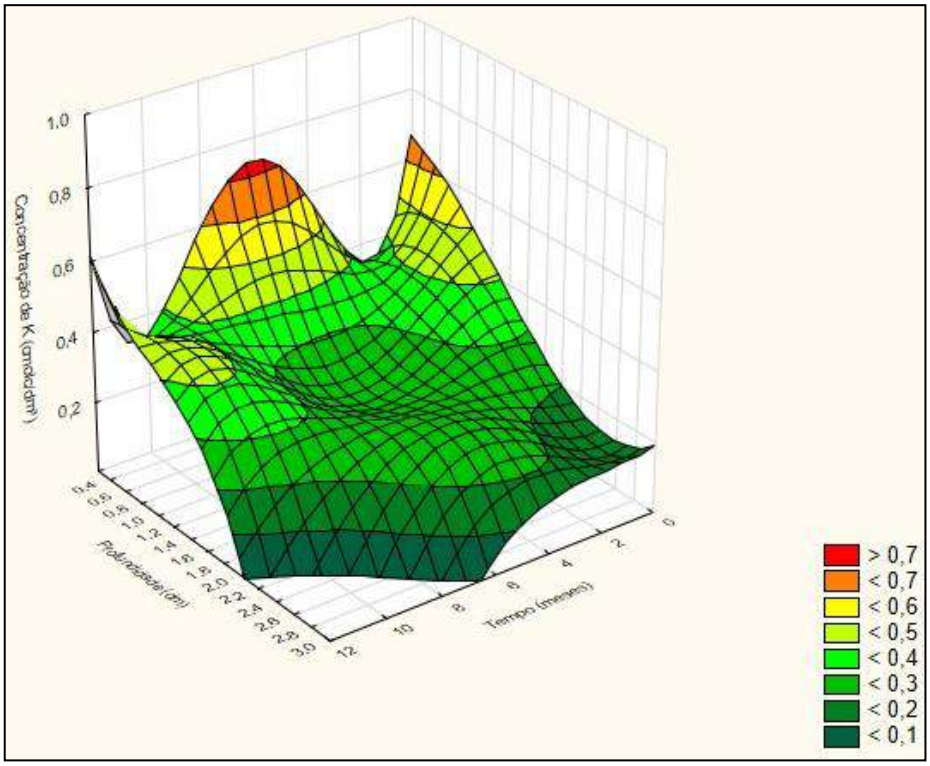

Figura 6. Superfície originada por meio do novo ajuste aos valores da profundidade.

Nesse sentido, cada um dos tratamentos, considerando níveis de compactação e aplicação combinado de calcário/gesso, recebeu o mesmo procedimento em relação aos ajustes matemáticos, inclusive, para K, Ca, Mg e a saturação por Al, totalizando 64 ajustes matemáticos.

4.2. Correção do pH

A Tabela 7 apresenta os valores médios de pH ($CaCl_2$) das camadas aos 0, 3, 6, 9 e 12 meses após a instalação do experimento. De acordo com a ANOVA, temos que o tratamento e o tempo influenciaram os valores da variável resposta pH.

Tabela 7. Valores médios de pH ($CaCl_2$) das camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,1; 0,1-0-0,2 e 0,2-0,4 m aos 0, 3, 6, 9 e 12 meses após a instalação do experimento.

	Meses após a implantação do experimento				
Tratamento	**0**	**3**	**6**	**9**	**12**
			Camada 0-0,05 m		
T1/0P	4,70	4,87 abc	4,56 c	4,77 b	4,92 c
T1/1P	4,80	4,49 c	4,69 bc	4,88 b	4,54 c
T1/3P	4,75	4,91 abc	4,75 bc	4,72 b	4,55 c
T1/5P	4,75	4,70 bc	4,62 bc	5,17 ab	5,04 abc
T2/0P	4,65 B	5,62 abc A	5,05 abc AB	4,88 b B	5,02 abc AB
T2/1P	4,65 B	5,43 ab A	4,91 abc AB	5,35 ab A	4,69 c B
T2/3P	4,55 C	5,24 abc AB	5,38 ab A	5,77 a A	4,68 c BC
T2/5P	4,85 C	5,05 abc BC	4,70 bc C	5,84 a A	5,52 ab AB
T3/0P	4,65	4,70 bc	4,84 abc	4,73 b	4,64 c
T3/1P	4,65	4,80 bc	4,76 abc	4,89 b	4,70 c
T3/3P	4,40	4,62 c	4,73 bc	4,73 b	4,99 abc
T3/5P	4,65 B	5,29 abc AB	5,16 abc AB	5,34 ab A	5,23 abc AB
T4/0P	4,40 C	4,94 abc CB	5,15 abc AB	5,37 ab AB	5,65 a A
T4/1P	4,55 C	5,09 abc ABC	5,57 a A	5,32 ab AB	4,72 bc BC
T4/3P	4,50 C	5,06 abc BC	4,83 abc BC	5,88 a A	5,32 abc AB
T4/5P	4,90 B	5,10 abc B	5,30 abc AB	5,90 a A	5,03 abc B
DMS coluna	**0,81**				
DMS linha	**0,63**				
CV%	**4,63**				
			Camada 0,05-0,1 m		
T1/0P	4,35	4,44	4,36 ab	4,20 b	4,50 B
T1/1P	4,65	4,50	4,49 ab	4,73 ab	4,47 B
T1/3P	4,55	4,63	4,77 ab	4,64 ab	4,43 B
T1/5P	4,40	4,67	4,65 ab	4,92 ab	4,73 B

Tabela 7. Continuação.

T2/0P	4,75		4,71		4,92	ab	4,63	ab	4,88	ab
T2/1P	4,45		4,72		4,79	ab	4,63	ab	4,51	B
T2/3P	4,60		5,03		5,03	a	5,07	a	4,65	B
T2/5P	4,40	C	4,92	a BC	4,66	ab BC	5,13	a AB	5,51	a A
T3/0P	4,65		4,53		4,49	ab	4,38	ab	4,56	B
T3/1P	4,65		4,81		4,88	ab	4,72	ab	4,54	B
T3/3P	4,15	B	4,37	AB	4,28	b B	4,40	ab AB	4,90	ab A
T3/5P	4,35	B	4,55	AB	4,78	ab AB	4,86	ab AB	5,13	ab A
T4/0P	4,20		4,48		4,23	b	4,57	ab	4,68	B
T4/1P	4,55		4,73		4,85	ab	4,27	b	4,61	B
T4/3P	4,20	B	4,89	AB	4,34	ab AB	4,75	ab AB	4,50	b A
T4/5P	4,35	B	4,53	AB	4,57	ab AB	4,86	ab AB	4,99	ab A
DMS coluna	**0,75**									
DMS linha	**0,59**									
CV%	**4,58**									
				Camada 0,1-0,2 m						
T1/0P	4,05	b	4,34		4,27	ab	4,24	bc	4,28	B
T1/1P	4,55	ab	4,44		4,53	ab	4,62	abc	4,46	Ab
T1/3P	4,45	ab	4,67		4,70	ab	4,54	abc	4,40	Ab
T1/5P	4,25	ab	4,50		4,37	ab	4,67	abc	4,47	Ab
T2/0P	4,80	a	4,80		4,61	ab	4,44	abc	4,57	Ab
T2/1P	4,35	ab	4,32		4,56	ab	4,58	abc	4,42	Ab
T2/3P	4,45	ab	4,65		4,80	a	4,93	a	4,64	Ab
T2/5P	4,30	ab B	4,82	AB	4,38	ab B	4,67	abc AB	5,01	a A
T3/0P	4,45	ab	4,30		4,28	ab	4,46	abc	4,44	Ab
T3/1P	4,40	ab	4,82		4,55	ab	4,53	abc	4,49	Ab
T3/3P	4,15	ab B	4,31	AB	4,25	ab B	4,42	abc AB	4,78	ab A
T3/5P	4,10	b B	4,19	B	4,41	ab AB	4,73	ab A	4,86	ab A
T4/0P	4,15	ab	4,25		4,05	b	4,19	bc	4,25	B
T4/1P	4,35	ab	4,54		4,56	ab	4,06	c	4,52	Ab
T4/3P	4,25	ab	4,42		4,24	ab	4,41	abc	4,34	B
T4/5P	4,00	b B	4,32	AB	4,27	ab AB	4,40	abc AB	4,54	ab A
DMS coluna	**0,66**									
DMS linha	**0,52**									
CV%	**4,18**									
				Camada 0,2-0,4 m						
T1/0P	4,00		4,06	b	4,18	bc	4,08	b	4,13	b
T1/1P	4,45		4,28	b	4,28	bc	4,45	ab	4,43	ab
T1/3P	4,45		4,56	ab	4,68	ab	4,67	ab	4,57	ab
T1/5P	4,15		4,37	b	4,26	bc	4,46	ab	4,37	ab
T2/0P	4,40		4,52	b	4,25	bc	4,32	b	4,41	ab
T2/1P	4,30		4,26	b	4,32	abc	4,49	ab	4,39	ab
T2/3P	4,30		4,48	b	4,92	a	4,97	a	4,56	ab
T2/5P	4,10		4,57	ab	4,29	bc	4,42	ab	4,55	ab

Tabela 7. Continuação.

T3/0P	4,20	4,37 b	4,15 bc	4,42 ab	4,34 ab
T3/1P	4,10	4,66 ab	4,50 abc	4,53 ab	4,47 ab
T3/3P	4,05	4,30 b	4,16 bc	4,26 b	4,78 a
T3/5P	3,95	4,06 b	4,29 bc	4,64 ab	4,53 ab
T4/0P	4,15	4,27 b	3,95 bc	4,28 b	4,14 b
T4/1P	4,35	5,15 a	4,63 ab	4,07 b	4,43 ab
T4/3P	3,95	4,22 b	4,27 bc	4,17 b	4,23 ab
T4/5P	3,90	4,15 b	4,16 bc	4,12 b	4,20 ab
DMS coluna	**0,61**				
DMS linha	**0,48**				
CV%	**3,94**				

Médias seguidas de letras, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

Os tratamentos T1/0P, T1/1P, T1/3P e T3/0P não obtiveram influência do tempo em suas médias. No momento da primeira coleta (0 meses), verifica-se que os valores de pH estão baixos em todos os tratamentos e camadas, situação que caracteriza solo ácido, sendo necessária a correção do solo para melhores índices de produtividade. Nos dias seguintes da primeira coleta, houve a aplicação de gesso e calcário, conforme croqui (Figura 2).

Aos 3 meses de coleta, verifica-se que as médias do pH se elevaram principalmente nos tratamentos T2 e T4 nos diferentes níveis de compactação (0P, 1P, 3P, 5P) na primeira camada coletada (0,0-0,05 m). Esse efeito perdurou nos seguintes meses de coleta (6, 9 e 12 meses). Ainda observando a primeira camada, identifica-se que estatisticamente os tratamentos T2/1P, T2/3P, T2/5P, T4/0P, T4/3P e T4/5P foram os que mantiveram a correção do solo em um maior período, evidenciando que o uso somente do calcário foi melhor do que o uso do gesso após a aplicação de calcário.

No estudo de Garlet (2018), observou-se que todos os tratamentos na camada de 0,0-0,1 m em que o calcário foi aplicado, houve aumento numérico no pH H_2O com valores de até 0,4 unidades quando comparado com a testemunha que não recebeu aplicações.

Em relação a segunda camada coletada (0,05-0,1 m), estatisticamente não foram registradas diferenças significativas aos 0 e 3 meses de coleta considerando o tratamento recebido. Aos 6 meses, as maiores médias de pH foram identificadas no tratamento T2/3P, que seguiu com valores altos nas coletas seguintes de 9 e 12 meses.

Considerando a variável do tempo em cada tratamento, somente os tratamentos T2/5P, T3/3P, T3/5P, T4/3P e T4/5P obtiveram diferença significativa. Em todos esses tratamentos, as maiores médias de pH foram encontradas aos 12 meses de coleta. Há pouca efetividade das práticas de correção da acidez no SPD, com aplicação na superfície sem incorporação nas primeiras semanas (CIOTTA et al., 2002).

A calagem superficial não tem efeito rápido na redução da acidez do subsolo, particularmente em solos com cargas variáveis, porém, dependendo dos critérios empregados na recomendação da calagem a aplicação superficial de calcário também pode, ao longo dos anos, amenizar os efeitos nocivos da acidez em camadas mais profundas do solo. Ao longo do tempo, após a aplicação superficial de calcário em SPD, vai ocorrendo melhoria no gradiente de acidez da superfície em direção ao subsolo.

Analisando a camada de 0,1-0,2 m, verifica-se que, em relação ao tratamento recebido, todos diferiam desconsiderando aos 3 meses de coleta, em que os tratamentos foram estatisticamente iguais. Considerando os diferentes períodos coletados, somente os tratamentos T2/5P, T3/3P, T3/5P e T4/5P diferiam estatisticamente.

A quarta camada de 0,2-0,4 m de profundidade apresentou diferença estatísticas entre os tratamentos aos 3, 6, 9 e 12 meses de coleta. Aos 3 meses de coleta, a maior média foi encontrada no tratamento T4/1P, aos 6 e 9 meses depois da implementação do experimento a maior média se deu no tratamento T2/3P, e aos 12 meses a maior média se deu no tratamento T3/3P. Considerando cada tratamento em relação ao tempo estaticamente não houve diferença estatística nas diferentes coletas.

De modo geral, pode-se dizer que somente houve correção do pH nas camadas mais superficiais, mesmo nos tratamentos em que houve a aplicação do gesso. Nesse sentido, nas camadas mais profundas encontramos um ambiente mais homogêneo. Ao longo do tempo, após a aplicação superficial de calcário em SPD, vai ocorrendo melhoria no gradiente de acidez da superfície em direção ao subsolo. Contudo, a reaplicação superficial de calcário em solo já corrigido com calagem na superfície pode facilitar a movimentação do calcário em direção ao subsolo e

proporcionar melhoria ainda mais acentuada na acidez do perfil do solo (CAIRES, 2013).

Os resultados de pH encontrados apresentaram baixa variabilidade, sendo: CV = 4,63 % (camada 0,0 – 0,05 m); CV = 4,58 % (camada 0,05 – 0,1 m) ; CV = 4,18 % (camada 0,1 – 0,2 m); e CV = 3,94 % (camada 0,2 – 0,4 m).

4.2. Movimentação do cálcio

A Tabela 8 apresenta os valores médios de Ca ($cmol_c/cm^3$) das camadas avaliadas aos 0, 3, 6, 9 e 12 meses após a instalação do experimento.

Tabela 8. Valores médios de Ca ($cmol_c/cm^3$) das camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,1; 0,1-0-0,2 e 0,2-0,4 m aos 0, 3, 6, 9 e 12 meses após a instalação do experimento.

	Meses após a implantação do experimento				
Tratamento	**0**	**3**	**6**	**9**	**12**
			Camada 0-0,05 m		
T1/0P	4,75 ab	5,93 cd	5,11	5,48 ab	5,03
T1/1P	4,78 ab	6,34 bcd	4,52	6,16 ab	5,90
T1/3P	4,77 ab	6,29 bcd	5,95	7,29 ab	5,02
T1/5P	6,86 ab	6,27 bcd	5,30	6,96 ab	5,65
T2/0P	4,69 ab	6,65 abcd	5,87	6,39 ab	5,90
T2/1P	5,01 ab B	7,79 abcd AB	5,60 B	9,03 a A	5,64 B
T2/3P	6,17 ab B	9,07 abcd A	8,26 AB	6,98 a AB	5,73 AB
T2/5P	7,83 a A	8,12 abcd B	4,50 A	8,89 ab A	8,25 A
T3/0P	4,88 ab	7,76 abcd	5,56	7,23 ab	5,47
T3/1P	4,75 ab B	9,15 abcd A	6,97 AB	5,80 ab B	5,66 B
T3/3P	5,02 ab	5,15 D	5,91	5,93 ab	6,90
T3/5P	6,20 ab B	10,35 ab A	6,56 B	7,93 ab AB	7,97 AB
T4/0P	3,58 b B	7,41 abcd A	6,57 AB	7,44 ab A	8,83 A
T4/1P	4,45 ab B	10,68 a A	6,58 B	4,65 b B	5,58 B
T4/3P	5,26 ab B	7,53 abcd AB	6,00 AB	8,79 ab A	6,28 AB
T4/5P	7,07 ab	9,72 abc	7,14	9,15 a	8,38
DMS coluna	**4,14**				
DMS linha	**3,27**				
CV%	**17,93**				
			Camada 0,05-0,1 m		
T1/0P	3,07	3,34 b	3,38	3,69	2,95 B
T1/1P	4,44	5,21 ab	3,37	4,56	4,52 Ab
T1/3P	3,83	4,11 ab	6,07	5,00	3,76 ab
T1/5P	3,84	4,00 ab	4,73	4,69	4,33 ab

Tabela 8. Continuação.

T2/0P	4,44		4,07	ab	4,05		5,22	4,53	ab
T2/1P	3,59		4,13	ab	5,20		5,62	4,47	ab
T2/3P	5,33		6,32	ab	6,04		5,64	4,37	ab
T2/5P	4,31		5,54	ab	4,04		5,40	7,02	a
T3/0P	4,04		4,14	ab	2,88		5,85	5,51	ab
T3/1P	4,21	B	7,49	a	A	5,81	AB	3,80	B	4,28	ab	B
T3/3P	3,65		3,19	b	3,22		3,59	5,82	ab
T3/5P	4,35	AB	3,97	ab	AB	3,43	B	6,60	A	6,91	a	A
T4/0P	1,70	B	4,09	ab	AB	3,62	AB	3,24	AB	5,27	ab	A
T4/1P	3,76		5,72	ab		5,92		3,61		4,81	ab	
T4/3P	3,57		3,33	b		3,35		4,56		3,74	ab	
T4/5P	3,82		4,82	ab		2,94		5,10		5,90	ab	
DMS coluna		**3,8**										
DMS linha		**2,99**										
CV%		**24,01**										
					Camada 0,1-0,2 m				
T1/0P	1,30		2,03			2,69		3,65	ab	2,10		
T1/1P	3,40		4,65			3,09		3,34	ab	3,62		
T1/3P	2,42		3,95			4,19		4,44	ab	3,40		
T1/5P	2,71		2,47			1,83		2,68	ab	2,53		
T2/0P	4,11		3,97			3,97		2,84	ab	2,68		
T2/1P	2,58		4,00			3,16		4,28	ab	3,35		
T2/3P	3,90		4,28			5,20		5,84	a	4,39		
T2/5P	3,21		4,56			2,42		3,21	ab	5,55		
T3/0P	2,63		2,83			1,73		4,30	ab	4,13		
T3/1P	2,49	B	5,83	A		3,20	AB	3,93	ab	AB	3,76	AB
T3/3P	2,52		3,10			2,89		3,07	ab	4,95		
T3/5P	2,09		2,23			2,65		4,68	ab	5,32		
T4/0P	1,68		2,83			1,22		2,53	ab	2,45		
T4/1P	2,59	AB	5,27	A		4,21	AB	1,38	b	B	3,99	A
T4/3P	2,42		2,81			2,64		2,76	ab	2,72		
T4/5P	1,75		3,00			2,05		3,40	ab	4,54		
DMS coluna		**4,13**										
DMS linha		**3,26**										
CV%		**35,57**										
					Camada 0,2-0,4 m				
T1/0P	0,69		1,44			1,36	b	1,54		1,28	A	
T1/1P	2,39		2,21			1,46	b	1,91		2,45	A	
T1/3P	2,32		2,41			3,81	ab	2,63		3,58	A	
T1/5P	1,44		1,53			1,29	b	1,28		1,75	A	
T2/0P	2,09		1,95			1,90	b	2,30		1,95		
T2/1P	1,58		2,41			1,39	b	2,67		2,32		
T2/3P	2,75	B	2,54	B		6,33	a	A	3,32	B	2,84	B
T2/5P	1,51		1,81			1,28	b	1,84		2,52		

Tabela 8. Continuação.

T3/0P	0,90		2,16		1,26	b	2,61		2,16	
T3/1P	1,09	B	4,23	A	2,39	b AB	2,56	AB	2,22	AB
T3/3P	1,44		1,89		2,22	b	1,25		3,76	
T3/5P	0,93		1,16		1,89	b	2,30		2,97	
T4/0P	0,96		1,79		0,78	ab	1,34		1,59	
T4/1P	1,95	AB	4,26	A	3,90	a AB	1,12	B	2,81	AB
T4/3P	1,31		1,13		2,45	b	1,55		1,62	
T4/5P	0,89		1,66		1,55	b	1,72		2,31	
DMS coluna		**3,56**								
DMS linha		**2,81**								
CV%		**49,08**								

Médias seguidas de letras, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

Observando a primeira camada (0,0-0,05 m) estatisticamente por meio da do teste de comparação de médias somente os tratamentos T2/1P, T2/3P, T2/5P, T3/1P, T3/5P, T4/0P, T4/1P e T4/3P sofreram influência do tempo em suas médias. Na primeira coleta, a maior média foi encontrada em T2/5P, e aos 3 meses em T4/1P. Aos 6 meses, os tratamentos não diferiram e, aos 9 meses as maiores médias foram em T2/1P, T2/3P e T4/5P. Aos 12 meses, também não houve diferença estatística pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Na segunda camada e as épocas de coleta, somente os tratamentos T3/1P, T3/5P e T4/0P. Vale frisar que em T3/5P e T4/0P as maiores médias foram encontradas aos 12 meses de coleta. Em relação aos tratamentos em cada mês coletado, aos 0, 6 e 9 meses não foram encontradas diferenças estatísticas. Aos 3 após a implementação do experimento, as maiores médias de Ca se deram no tratamento T3/1P e, aos 9 meses, as maiores médias foram encontradas nos tratamentos T2/5P e T3/5P.

Na terceira camada, somente aos 9 meses de coleta os tratamentos diferiram, visto que o tratamento T2/3P apresentou a maior média da concentração de Ca. Em relação a cada tratamento considerando o tempo, somente os tratamentos T3/1P e T4/1P apresentaram diferenças.

Na camada de 0,2-0,4 m de profundidade, somente aos 6 meses de coleta pode ser observado efeito dos tratamentos, sendo que o tratamento T4/1P foi o que se destacou com média mais alta. Considerando o tempo, os tratamentos T2/3P, T3/1P e T4/1P foram os que estatisticamente não são iguais.

De modo geral, pode-se dizer que somente houve incremento do Ca nas camadas mais superficiais, nas camadas mais profundas a concentração de Ca foi relativamente menor. Aos 3 meses, houve acréscimo por conta da incrementação de Ca em determinados tratamentos.

Chama atenção os dados dos tratamentos T3, os quais também sofreram acréscimo, contudo, o componente Ca não foi incrementado, pois esse tratamento recebeu somente a aplicação de gesso. O tratamento T1, independente do número de passadas do rolo compactador, apresentou valores de Ca abaixo de 4 $cmol_c/cm^3$ ao longo do tempo (6, 9 e 12 meses).

As concentrações de Ca encontradas apresentaram alta variabilidade, sendo: CV = 17,93 % (camada 0,0 – 0,05 m); CV = 24,01 % (camada 0,05 – 0,1 m); CV = 35,57 % (camada 0,1 – 0,2 m); e CV = 49,08 % (camada 0,2 – 0,4 m). Resultados maiores que 30 % para CV possuem dispersão elevada, indicando heterogeneidade dessa variável na área de estudo (GOMES, 1990).

A seguir, nas Figuras 7 e 8, encontram-se os gráficos gerados por meio do ajuste matemático do movimento do nutriente Ca no perfil do solo.

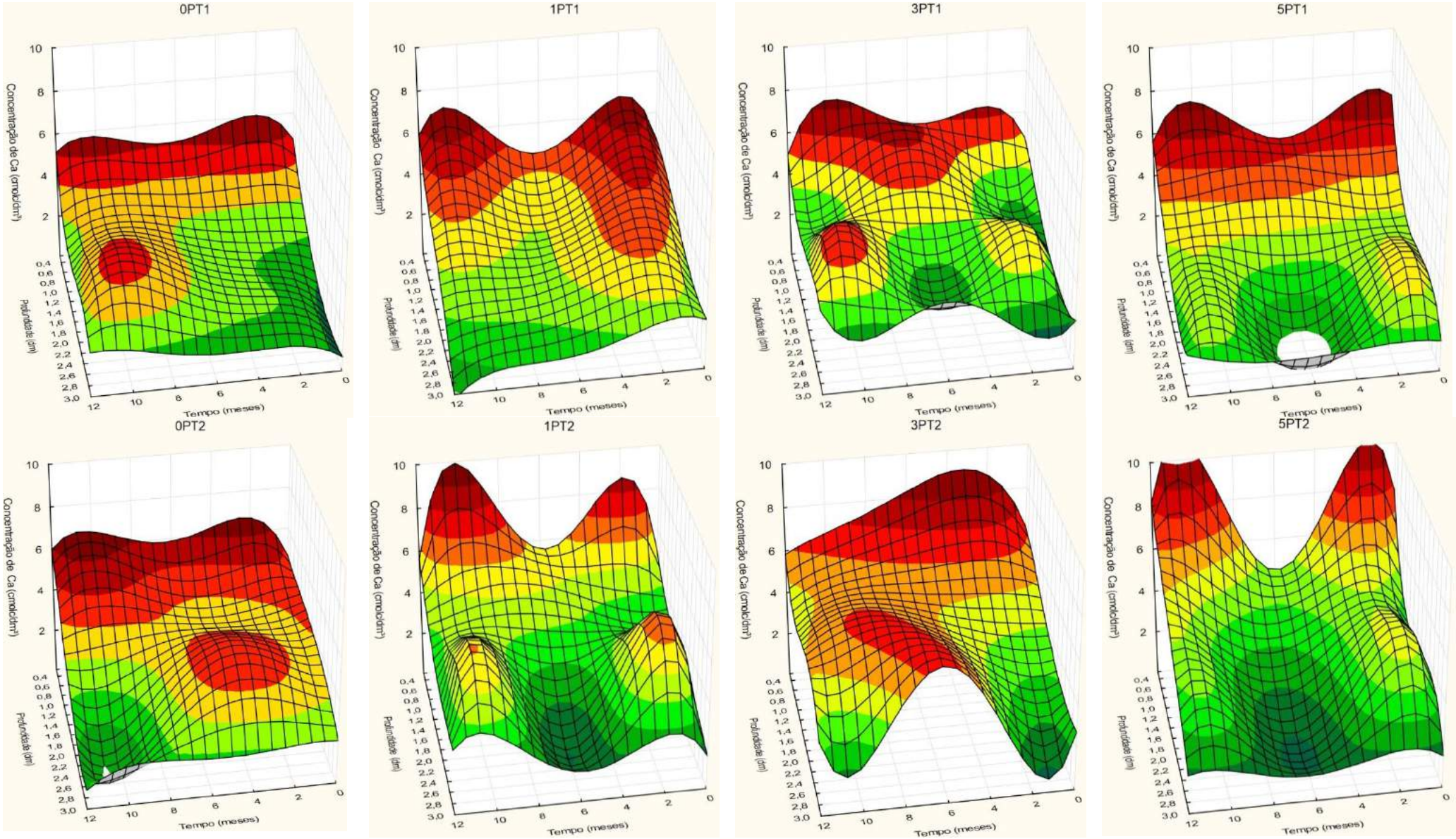

Figura 7. Concentração de Ca no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT1, 1PT1, 3PT1, 5PT1, 0PT2, 1PT2, 3PT2 e 5PT2).

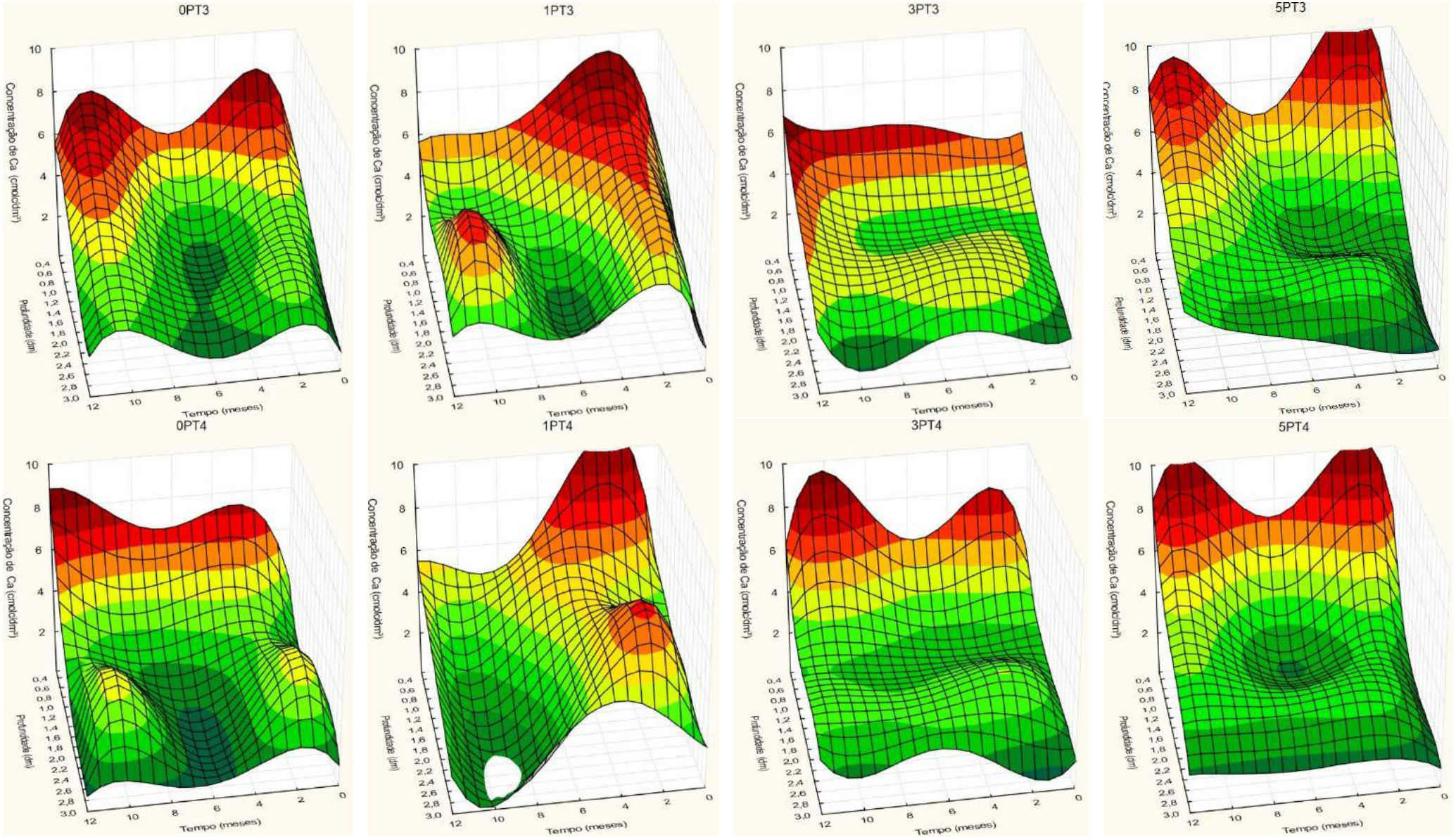

Figura 8. Concentração de Ca no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT3, 1PT3, 3PT3, 5PT3, 0PT4, 1PT4, 3PT4 e 5PT4).

O ajuste matemático de todos os tratamentos seguiu os mesmos passos demonstrados nos tópicos 3.7. e 4.2. deste documento. Vale lembrar que o erro R^2 de cada um dos modelos gerados foi exatamente igual a 1, em razão da modelagem considerar a quantidade de termos ajustados igual a quantidade de termos coletados.

O ajuste matemático evidenciou que, ao longo do tempo, os teores de Ca sofreram variações. O aspecto que envolve a proporção de Ca ao longo do perfil do solo apresentou que menores valores são encontrados conforme maior for a profundidade (REZENDE, 2018).

Considerando a movimentação vertical de Ca, mecanismos como o deslocamento vertical de partículas finas de calcário decorrentes de condições favoráveis de estruturação do solo e de mobilização química do Ca nas formas inorgânicas, principalmente com sais de nitrato e sulfato, e orgânicas devem ser consideradas como fatores de auxílio e/ou impedimento (CAIRES, 2013).

Outra possibilidade da não descida do Ca pode estar associada ao fato de que o curto tempo de duração do experimento (12 meses) não tenha sido o suficiente para propiciar uma maior descida do íon Ca no perfil do solo.

Além disso, conforme a profundidade aumenta, menor é a variação que o elemento químico sofre. Em contrapartida, nas camadas mais superficiais o Ca sofre acréscimos e decréscimos que variam conforme a quantidade absorvida pelas culturas e o potencial que o Ca tem de se movimentar no perfil do solo.

O Ca sofreu menores variações quando o estado estrutural do solo estava melhor (0PT1, 0PT2, 0PT3 e 0PT4). Estes tratamentos não receberam compactação do solo, o que proporcionou mias uniformidade na concentração do elemento ao longo do perfil do solo.

Isso se deve aos melhores índices de densidade e porosidade. Considerando o aspecto físico Ksat, os tratamentos sem compactação também obtiveram melhores índices, mais uma vez corroborando para a teoria de que um solo com melhores características estruturais fornece nutrientes em melhores quantidades (MALAVOLTA, 2005).

Nos tratamentos que receberam níveis de compactação, tal concentração reduziu ao longo do perfil com menores valores de Ca nas camadas mais profundas do solo. Fica evidente que o tratamento em que houve a aplicação de gesso após o

calcário (T4) conseguiu proporcionar maior teor de Ca em profundidade, principalmente se comparado com o tratamento que não obteve a aplicação de gesso (T1). Assim, por conta do gesso ser mais solúvel, saturou com o Ca, como também com a solução do solo, culminando na diminuição da reação de hidrólise no calcário. Proporcionando maiores concentrações de Ca em profundidade.

Os efeitos químicos da lixiviação de Ca no perfil do solo em relação ao uso do gesso foram similares aos observados pelos pesquisadores Caires et al. (2001; 2002; 2004); Amaral et al. (2017) verificaram que houve aumento da movimentação do Ca trocável no perfil do solo com aplicação de gesso agrícola.

4.3. Saturação por alumínio

A Tabela 9 apresenta os valores médios de Al ($cmol_c/cm^3$) das camadas aos 0, 3, 6, 9 e 12 meses após a instalação do experimento. Estatisticamente, as médias de todos os tratamentos aos 0 e 12 meses de coleta não diferem entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

Utilizando os mesmos meios de análise estatística, porém em relação à mudança de concentração da saturação por Al no tempo, verifica-se que somente têm diferenças estatísticas as médias de T1/5P, T4/0P(0,0-0,05 m); T3/3P (0,05-0,1 m); T3/5P (0,1-0-0,2 m); e T4/1P (0,2-0,4 m).

Tabela 9. Valores médios da saturação por Al ($cmol_c/cm^3$) das camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,1; 0,1-0-0,2 e 0,2-0,4 m aos 0, 3, 6, 9 e 12 meses após a instalação do experimento.

	Número de meses após a implantação do experimento				
Tratamento	**0**	**3**	**6**	**9**	**12**
			Camada 0-0,05 m		
T1/0P	0,14 a	0,04 a	0,06 a	0,04 a	0,03 A
T1/1P	0,07 a	0,07 A	0,14 a	0,02 a	0,08 A
T1/3P	0,16 a	0,03 A	0,05 a	0,05 a	0,20 A
T1/5P	0,06 a B	0,43 b A	0,10 a B	0,00 a B	0,01 a B
T2/0P	0,08 a	0,00 A	0,03 a	0,02 a	0,00 A
T2/1P	0,09 a	0,00 a	0,03 a	0,00 a	0,06 A
T2/3P	0,03 a	0,00 a	0,00 a	0,00 a	0,03 A
T2/5P	0,03 a	0,01 a	0,05 a	0,00 a	0,00 A

Tabela 9. Continuação.

T3/0P	0,09 a	0,14 ab	0,04 a	0,05 a	0,03 A
T3/1P	0,09 a	0,03 a	0,02 a	0,13 a	0,13 A
T3/3P	0,23 a	0,06 a	0,12 a	0,11 a	0,00 A
T3/5P	0,08 a	0,00 a	0,01 a	0,00 a	0,00 A
T4/0P	0,31 a A	0,05 a B	0,03 a B	0,00 a B	0,00 a B
T4/1P	0,18 a	0,01 a	0,00 a	0,00 a	0,01 A
T4/3P	0,12 a	0,01 a	0,03 a	0,00 a	0,00 A
T4/5P	0,02 a	0,00 a	0,00 a	0,00 a	0,01 A
DMS coluna	**0,32**				
DMS linha	**0,26**				
CV%	**172,07**				
		Camada 0,05-0,1 m			
T1/0P	0,53 a	0,62 a	0,75 ab	0,53 a	0,32 A
T1/1P	0,18 a	0,46 a	0,36 ab	0,39 a	0,23 A
T1/3P	0,32 a	0,33 a	0,08 ab	0,11 a	0,45 A
T1/5P	0,43 a	0,19 a	0,21 ab	0,13 a	0,21 A
T2/0P	0,05 a	0,17 a	0,05 ab	0,25 a	0,08 A
T2/1P	0,41 a	0,47 a	0,06 ab	0,20 a	0,21 A
T2/3P	0,05 a	0,03 a	0,00 b	0,00 a	0,20 A
T2/5P	0,41 a	0,10 a	0,12 ab	0,12 a	0,00 A
T3/0P	0,17 a	0,40 a	0,44 ab	0,19 a	0,14 A
T3/1P	0,18 a	0,05 a	0,03 ab	0,22 a	0,57 A
T3/3P	0,74 a AB	0,84 a AB	0,95 ab A	0,69 a AB	0,01 a B
T3/5P	0,48 a	0,47 a	0,13 ab	0,15 a	0,00 A
T4/0P	1,04 a	0,55 a	1,13 a	0,64 a	0,31 A
T4/1P	0,65 a	0,29 a	0,25 ab	0,86 a	0,23 A
T4/3P	0,63 a	0,36 a	0,73 ab	0,27 a	0,26 A
T4/5P	0,51 a	0,78 a	0,56 ab	0,25 a	0,02 A
DMS coluna	**1,13**				
DMS linha	**0,89**				
CV%	**95,28**				
		Camada 0,1-0,2 m			
T1/0P	1,55 a	0,84 a	1,05 a	0,64 ab	0,79 A
T1/1P	0,39 a	0,45 a	0,33 a	0,58 ab	0,27 A
T1/3P	0,63 a	0,38 a	0,30 a	0,43 ab	0,60 A
T1/5P	0,75 a	0,59 a	0,70 a	0,40 ab	0,50 A
T2/0P	0,09 a	0,07 a	0,32 a	0,49 ab	0,20 A
T2/1P	0,64 a	1,16 a	0,27 a	0,73 ab	0,40 A
T2/3P	0,23 a	0,27 a	0,05 a	0,02 b	0,15 A
T2/5P	0,83 a	0,06 a	0,49 a	0,47 ab	0,00 A
T3/0P	0,47 a	0,70 a	0,82 a	0,51 ab	0,36 A
T3/1P	0,77 a	0,12 a	0,33 a	0,27 ab	0,65 A
T3/3P	1,03 a	0,87 a	0,96 a	0,78 ab	0,13 A
T3/5P	1,44 a A	1,38 a AB	0,59 a AB	0,40 ab AB	0,08 a B

Tabela 9. Continuação.

T4/0P	1,02 a	1,37 a	1,61 a	1,59 ab	1,00 A
T4/1P	1,00 a	0,77 a	0,78 a	1,89 a	0,55 A
T4/3P	1,19 a	1,23 a	1,03 a	0,93 ab	0,57 A
T4/5P	1,63 a	1,20 a	1,15 a	1,14 ab	0,38 A
DMS coluna	**1,72**				
DMS linha	**1,36**				
CV%	**72,57**				
		Camada 0,2-0,4 m			
T1/0P	1,58 a	1,23 a	1,06 a	0,84 abc	1,05 A
T1/1P	0,56 a	1,01 a	0,87 a	0,73 bc	0,74 A
T1/3P	0,69 a	0,45 a	0,35 a	0,40 bc	0,19 A
T1/5P	0,80 a	0,92 a	0,81 a	0,78 bc	0,89 A
T2/0P	0,55 a	0,45 a	0,55 a	0,69 bc	0,53 A
T2/1P	0,92 a	1,13 a	0,68 a	1,12 abc	0,24 A
T2/3P	0,52 a	0,63 a	0,03 a	0,16 c	0,61 A
T2/5P	1,04 a	0,61 a	0,80 a	0,94 abc	0,41 A
T3/0P	0,76 a	0,68 a	1,36 a	0,52 Bc	0,70 A
T3/1P	1,41 a	0,41 a	0,44 a	0,36 Bc	0,28 A
T3/3P	1,11 a	0,96 a	1,33 a	1,50 Abc	0,23 A
T3/5P	1,81 a	1,43 a	0,84 a	0,75 Bc	0,08 A
T4/0P	1,09 a	1,14 a	1,44 a	1,41 Abc	1,05 A
T4/1P	0,85 a AB	0,00 a B	0,93 a AB	1,87 ab A	0,43 a AB
T4/3P	1,37 a	1,62 a	0,85 a	1,43 Abc	1,33 A
T4/5P	2,00 a	1,67 a	1,25 a	2,45 A	0,98 A
DMS coluna	**1,67**				
DMS linha	**1,32**				
CV%	**53,4**				

Médias seguidas de letras, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

Características de solos ácidos de baixo pH normalmente apresentam valores elevados de Al na composição do solo. Observa-se que no momento da primeira coleta química de solos, os valores de Al estão elevados em muitos dos tratamentos analisados, principalmente nas camadas mais profundas.

O efeito dos tratamentos em cada camada pode ser visto por meio do mês de coleta. Na primeira camada, somente aos 3 meses de coleta diferenças estatísticas foram apresentadas. Na segunda camada, somente aos 6 meses, na terceira e quarta camada, somente aos 9 meses os efeitos puderam ser identificados.

Aos 3 meses de coleta, a correção do solo já havia sido realizada, logo, verifica-se que o tratamento que recebeu somente a aplicação de calcário T2's

(T2/0P, T2/1P, T2/3P, T2/5P), foi o que mais apresentou diferenças quanto à diminuição da saturação por Al.

Outro tratamento que também apresentou diminuição das médias foi o tratamento que recebeu aplicações de gesso posterior à aplicação de calcário T4's. Entretanto, tal tratamento, por ter o uso do gesso, fez com que a aplicação não diminuísse significativamente as médias aos 3 meses de coleta.

Ao longo do tempo, observa-se em praticamente todos os tratamentos que as médias da saturação por Al não sofreram mudanças significativas. Além disso, é possível perceber que os dados tendem a diminuir conforme o tempo, evidenciando que, aos 12 meses de coleta, as médias estão relativamente menores do que as médias coletadas no primeiro momento (0 meses).

Essa diminuição de Al ao longo do tempo é efeito das práticas de correção do pH que também apresentaram melhores médias ao longo do tempo, principalmente aos 12 meses de coleta (CAIRES, 2013). A interação entre o Al e a matéria orgânica é uma das reações que mais influencia as propriedades dos solos ácidos, pois a fração orgânica do solo possui a competência de complexar cátions. Em razão dos maiores teores de MO no SPD, a quantidade de Al complexado (Al-MO) torna-se de acentuada importância (ZAMBROSI; ALLEONI; CAIRES, 2007).

As concentrações de Al encontradas apresentaram alta variabilidade, sendo: CV = 172,07 % (camada 0,0 – 0,05 m); CV = 95,28 % (camada 0,05 – 0,1 m); CV = 72,57 % (camada 0,1 – 0,2 m); e CV = 53,4 % (camada 0,2 – 0,4 m). Resultados maiores que 30 % para CV possuem dispersão elevada, indicando heterogeneidade dessa variável na área de estudo (GOMES, 1990). Portanto, os valores estão altamente elevados para a saturação por Al, devido a quantidade de valores nulos disponíveis na amostra.

A seguir, nas Figuras 11 e 12, encontram-se os gráficos gerados por meio do ajuste matemático do movimento da saturação por Al no perfil do solo.

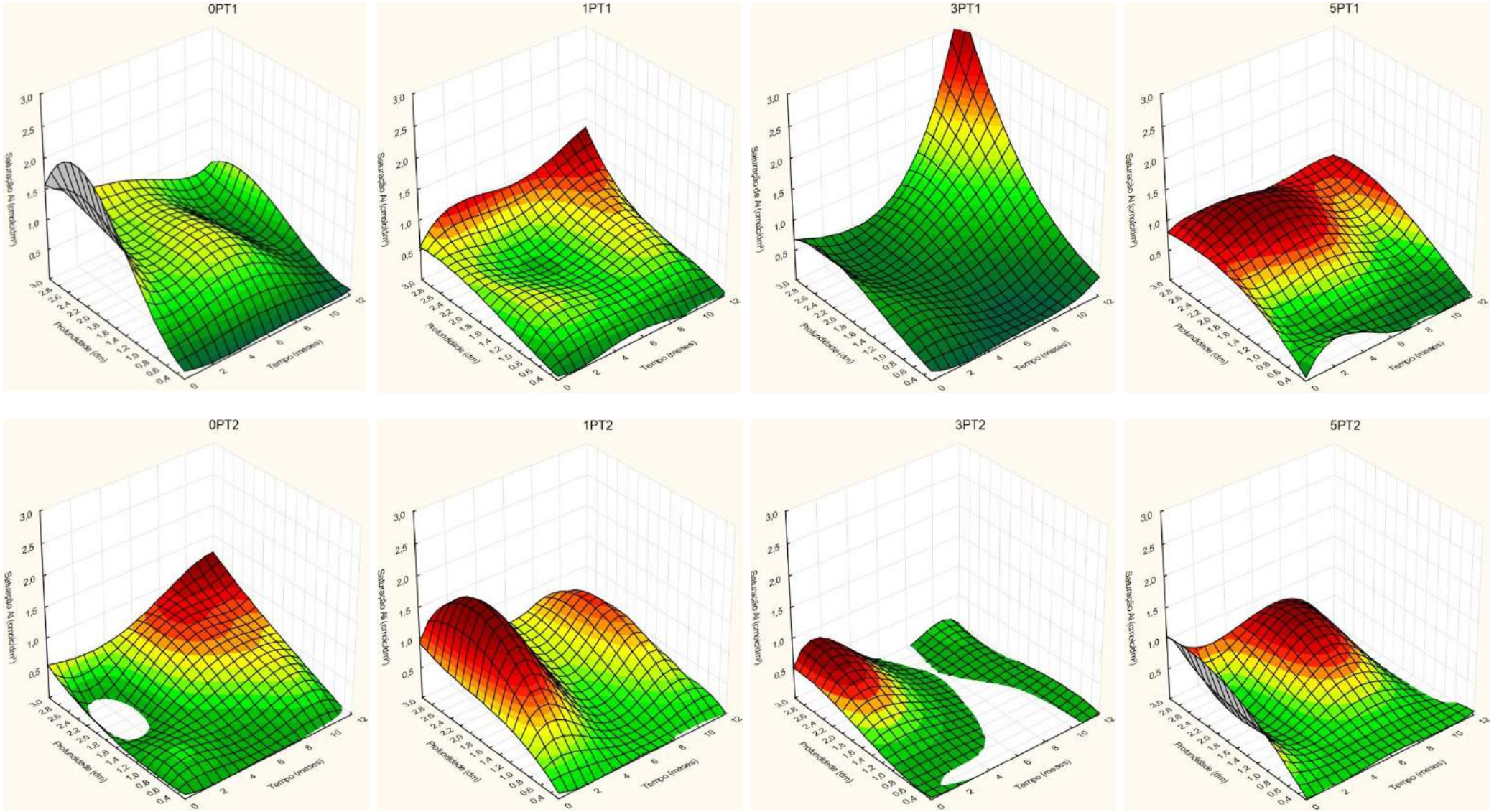

Figura 9. Saturação por Al no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT1, 1PT1, 3PT1, 5PT1, 0PT2, 1PT2, 3PT2 e 5PT2).

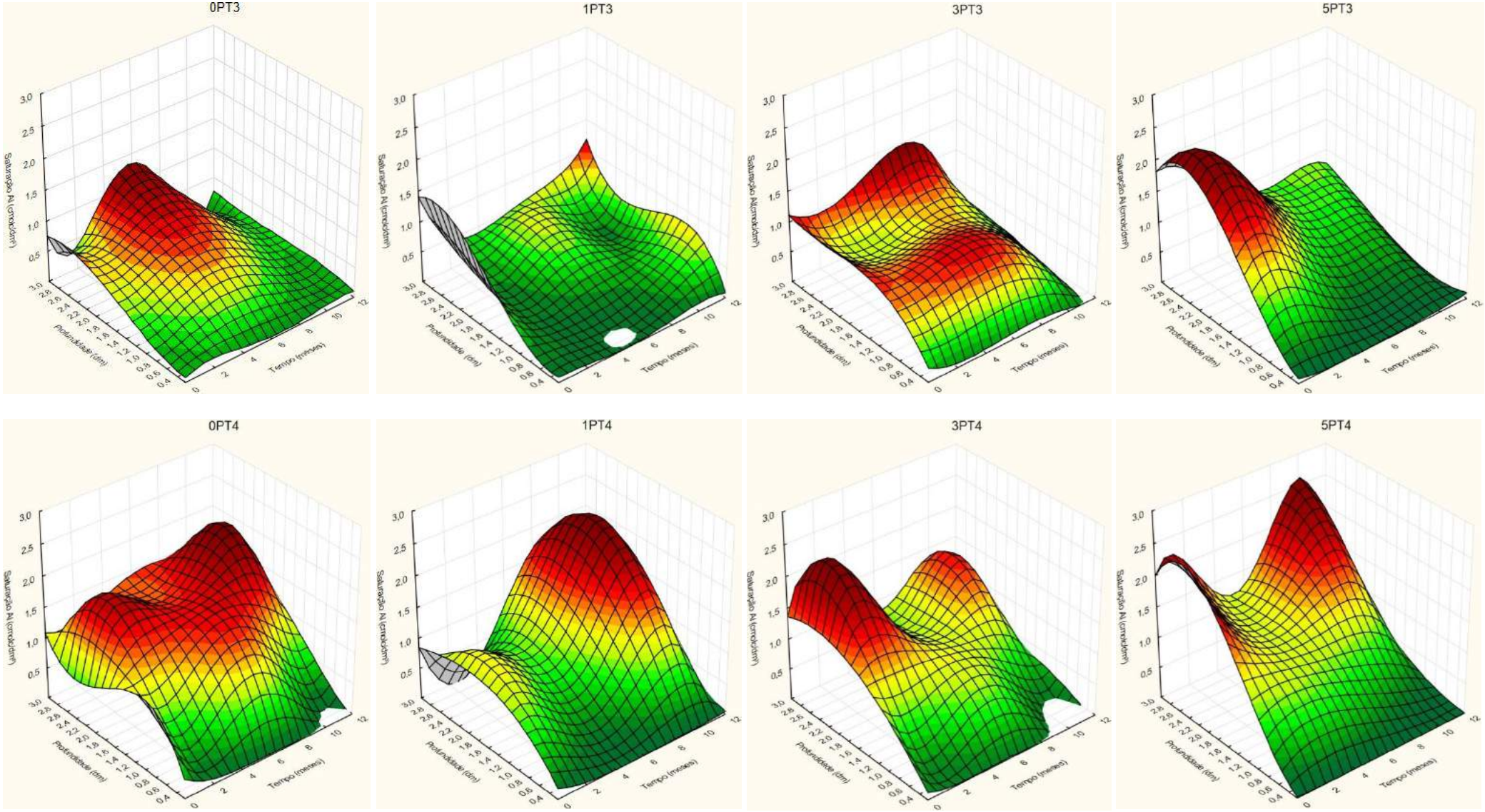

Figura 10. Saturação por Al no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT3, 1PT3, 3PT3, 5PT3, 0PT4, 1PT4, 3PT4 e 5PT4).

Com a saturação por Al no perfil do solo, temos uma característica distinta em relação aos outros gráficos. A saturação possui maior concentração conforme aumenta a profundidade. Verifica-se que próximo à superfície a saturação por Al é praticamente nula nos tratamentos que receberam doses de calcário, o que também foi encontrado nos estudos de Garlet (2018).

Valores de Al na superfície um pouco maiores são identificados nos tratamentos que não receberam calcário, sendo eles: 0PT1, 1PT1, 3PT1, 5PT1, 0PT3, 1PT3, 3PT3 e 5PT3.

Os tratamentos T2's foram os que apresentaram menores valores de Al em decorrência da sua correção por calcário. Os tratamentos T4's apresentaram comportamento não esperado, pois por conta da aplicação de gesso posterior à aplicação de calcário, esperava-se que a saturação por Al em profundidade fosse diminuída, visto que o gesso atuaria como um condicionador do calcário em profundidade (MALAVOLTA, 2005).

Considera-se que o valor mínimo de pH em que não se encontra Al trocável é 5,67 e, consequentemente no geral considera-se como prejudicial as plantas teres de Al acima de 0,5 e.mg/100g (FAQUIN, 2005). Nesse sentido, verifica-se que em praticamente todas as camadas mais profundas há a possibilidade de que as plantas sejam prejudicadas pela presença de Al.

Rezende (2018) e Sarmento et al. (2002) afirmam que, dentre os principais limitadores no solo para o pleno desenvolvimento do sistema radicular das culturas agrícolas, destacam-se os de ordem física, como a compactação, a redução da porosidade e da aeração do solo, e os de ordem química, como o excesso de Al (Al^{3+}) e os baixos teores de Ca (Ca^{2+}) e P em subsuperfície.

Os tratamentos em que a densidade do solo é menor, independente da aplicação ou não dos corretivos, a saturação por Al é menor. Com isso, a compactação do solo, o decréscimo do pH do solo e o intemperismo da argila contribuem para aumentar a liberação de alumínio.

Maiores valores da saturação por Al nas camadas mais profundas foram encontrados em tratamentos que receberam 5 passadas do rolo compactador. Nesse sentido, inferimos que em áreas com maior compactação, a neutralização do Al foi reduzida, possivelmente considerando a não lixiviação do íon S presente no gesso agrícola.

4.4. Movimentação do Magnésio

A Tabela 10 apresenta os valores médios de Mg ($cmol_c/cm^3$) das camadas de 0-0,1; 0,1-0-0,2 e 0,2-0,3 m aos 0, 3, 6, 9 e 12 meses após a instalação do experimento .

Estatisticamente, por meio da Anova ao zero mês de coleta, os valores da concentração média deste nutriente não diferem significativamente entre si. As médias de T1/0P, T1/1P, T1/3P, T1/5P, T3/0P, T3/1P, T4/0P e T4/3P não diferiam pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade, denotando que em tais tratamentos a concentração de Mg não se alterou.

Tabela 10. Valores médios de Mg ($cmol_c/cm^3$) das camadas de 0-0,1; 0,1-0-0,2 e 0,2-0,3 m aos 0, 3, 6, 9 e 12 meses após a instalação do experimento.

	Meses após a implantação do experimento									
Tratamento	**0**		**3**		**6**		**9**		**12**	
				Camada 0-0,05 m						
T1/0P	1,99		2,33	defg	1,68	ab	2,15	cd	2,00	bc
T1/1P	2,13		2,15	defg	1,61	ab	2,14	cd	2,00	bc
T1/3P	2,15		2,56	bcdefg	2,20	ab	2,90	abcd	1,87	bc
T1/5P	2,65		2,88	abcdefg	2,09	ab	2,92	abcd	2,32	abc
T2/0P	1,75	B	5,10	abc A	3,22	ab AB	3,65	abcd AB	3,02	abc AB
T2/1P	1,98	C	4,74	abcd AB	2,88	ab BC	5,01	ab A	1,84	bc C
T2/3P	2,51	B	5,41	a A	4,06	a AB	3,74	abcd AB	2,16	abc B
T2/5P	3,25	AB	5,20	ab A	2,49	ab B	5,25	a A	4,79	a A
T3/0P	1,89		1,09	fg	1,37	b	1,35	d	0,88	c
T3/1P	1,96		1,18	fg	1,70	ab	2,14	cd	1,14	c
T3/3P	1,77		0,95	g	1,40	b	1,25	d	2,43	abc
T3/5P	2,40		1,93	efg	3,08	ab	2,86	abcd	2,40	abc
T4/0P	1,47		2,50	cdefg	3,42	ab	3,17	abcd	3,48	abc
T4/1P	1,71		3,75	abcdef	3,34	ab	2,45	abcd	1,67	bc
T4/3P	1,83	B	4,14	abcde A	2,71	ab AB	3,78	abcd AB	2,90	abc AB
T4/5P	3,08	AB	3,45	abcdefg AB	1,58	ab B	4,71	abc A	4,07	ab A
DMS coluna	**2,66**									
DMS linha	**2,10**									
CV%	**28,52**									
				Camada 0,05-0,1 m						
T1/0P	1,13		1,33		1,11		1,43	abc	1,12	c
T1/1P	1,83		1,87		1,30		1,60	abc	1,54	bc
T1/3P	1,50		1,74		2,22		2,01	abc	1,37	bc
T1/5P	1,68		1,95		1,87		1,26	bc	1,97	bc

Tabela 10. Continuação.

T2/0P	1,72		2,03		1,54		2,01	abc	1,92	bc
T2/1P	1,51		1,80		2,00		2,27	abc	1,44	bc
T2/3P	2,14		2,69		2,34		2,01	abc	1,61	bc
T2/5P	1,88	B	2,44	AB	2,10	B	2,51	ab AB	3,71	a A
T3/0P	1,69		1,26		1,12		1,43	ABC	0,91	c
T3/1P	1,82	AB	2,16	AB	2,24	A	1,53	abc AB	0,87	c B
T3/3P	1,16		1,25		1,00		0,92	bc	2,15	abc
T3/5P	1,68	AB	1,42	B	2,04	AB	3,00	a A	2,96	ab A
T4/0P	0,73		1,37		0,79		1,16	bc	1,45	bc
T4/1P	1,61		1,89		1,83		0,62	c	1,42	bc
T4/3P	1,08		1,58		1,23		1,10	bc	1,50	bc
T4/5P	1,72		1,43		1,43		2,46	ab	2,42	abc
DMS coluna		**1,71**								
DMS linha		**1,35**								
CV%		**28,74**								
				Camada 0,1-0,2 m						
T1/0P	0,51		1,36		1,02		1,40	ab	0,81	ab
T1/1P	1,48		1,69		1,32		1,19	ab	1,28	ab
T1/3P	0,97		1,69		1,65		1,57	ab	1,21	ab
T1/5P	1,38		1,28		1,12		0,95	ab	1,32	ab
T2/0P	1,77		1,86		1,73		0,99	ab	1,27	b
T2/1P	1,16		1,35		1,32		1,52	ab	1,13	ab
T2/3P	1,76		1,61		1,99		2,47	a	1,75	ab
T2/5P	1,51		2,36		1,54		1,60	ab	2,79	a
T3/0P	1,21		0,92		0,85		1,53	ab	0,51	b
T3/1P	1,24		2,25		1,60		1,79	ab	1,13	ab
T3/3P	0,95		1,14		1,06		0,77	b	2,08	ab
T3/5P	1,03	AB	0,88	B	1,41	AB	2,36	a A	2,18	ab AB
T4/0P	0,81		0,98		0,54		0,85	ab	0,74	b
T4/1P	1,21	B	2,37	A	1,47	AB	0,46	b AB	1,46	ab AB
T4/3P	0,87		1,30		1,13		0,63	b	1,20	ab
T4/5P	0,87		1,19		1,36		1,80	ab	2,02	ab
DMS coluna		**1,73**								
DMS linha		**1,36**								
CV%		**35,99**								
				Camada 0,2-0,4 m						
T1/0P	0,20		0,84		0,63	b	0,48		0,67	
T1/1P	1,33		0,79		0,76	ab	0,97		1,15	
T1/3P	1,21		1,27		1,65	ab	1,29		1,56	
T1/5P	0,81		0,95		0,88	ab	0,80		0,99	
T2/0P	1,03		1,08		1,02	ab	0,87		0,90	
T2/1P	0,87		1,36		0,75	ab	0,77		1,02	
T2/3P	1,41		1,26		2,54	a	1,62		1,33	
T2/5P	0,80		1,27		1,04	ab	1,21		1,48	
T3/0P	0,72		0,91		0,79	ab	1,20		0,88	

Tabela 10. Continuação.

T3/1P	0,66		1,99		1,36	ab		1,22		0,98	
T3/3P	0,63		0,84		0,82	ab		0,38		1,80	
T3/5P	0,55		0,66		1,31	ab		1,37		1,52	
T4/0P	0,61		0,98		0,41	b		0,56		0,72	
T4/1P	1,14	AB	1,99	A	1,72	ab	AB	0,52	B	1,20	AB
T4/3P	0,55		0,63		1,13	ab		0,36		0,87	
T4/5P	0,55		0,93		1,10	ab		1,01		1,22	
DMS coluna	**1,80**										
DMS linha	**1,42**										
CV%	**50,00**										

Médias seguidas de letras, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

Os valores para a concentração média de Mg na testemunha estão de acordo com o levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná (LARACH, 1984).

Ao observar a primeira camada (0,0-0,05 m), verifica-se que aos 0 meses, todos os tratamentos foram considerados iguais em relação a concentração de Mg. Aos 3 meses, momento em que a aplicação de calcário e gesso já havia sido realizada, os tratamentos T2/3P, T2/5P, T2/0P e T2/1P foram os que apresentaram maiores médias em ordem decrescente.

Aos 6 meses de coleta, a maior média da concentração de Mg pode ser verificada no tratamento T2/3P. Já aos 9 meses de coleta, a maior média pode ser encontrada no tratamento T2/5P, a segunda maior no tratamento T2/1P e a terceira maior no tratamento T4/5P. Aos 12 meses de coleta, a maior média se manteve no tratamento T2/5P e a segunda maior no tratamento T4/5P.

Em relação a como o nutriente se comportou em cada tratamento quanto ao tempo, somente os tratamentos T2/0P, T2/1P, T2/3P, T2/5P, T4/3P e T4/5P sofreram diferenças estatísticas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Destaca-se que as maiores médias da concentração de Mg foram observadas nos tratamentos em que os níveis de densidade eram maiores, ou seja, a compactação do solo promoveu a não lixiviação de Mg.

Os dados da segunda camada coletada (0,05-0,1 m) somente apresentaram diferenças estatísticas aos 9 e 12 meses de coleta, denotando que a descida do nutriente Mg só foi promovida após os 6 meses de aplicação de calcário e gesso. Aos 12 meses, a maior média foi observada no tratamento T2/5P.

O fato relatado na segunda camada também foi observado na terceira camada (0,1-0,2 m), pois os tratamentos só foram estatisticamente diferentes aos 9 e 12 meses de coleta, visto que as maiores médias foram identificadas nos tratamentos T2/3P e T2/5P, respectivamente. Somente os tratamentos T3/5P e T4/1P apresentaram diferenças significativas da concentração do nutriente ao longo do tempo.

Na terceira camada coletada (0,2-0,4 m), somente aos 6 meses de coleta os tratamentos apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos, sendo que a maior média foi encontrada no tratamento T2/3P e a menor no tratamento T1/0P. Em relação à mudança de concentração em cada tratamento considerando o tempo, somente o tratamento T4/1P foi significativo, quando a maior média foi observada aos 3 meses de coleta.

Considerando aspectos gerais, no primeiro momento de coleta (0 meses) verifica-se que as médias estão estatisticamente semelhantes e com níveis de Mg baixos característica de solos ácidos. Após essa coleta, houve a aplicação de calcário em T2 e calcário seguido de gesso em T4. Verifica-se que a aplicação de calcário em ambos os tratamentos adicionou Mg ao solo, culminando em um aumento da concentração deste nutriente no solo.

Entretanto, verifica-se que as médias em T2 estão mais altas do que no tratamento T4, evidenciando que o gesso usado como condicionador do calcário no solo pode ter contribuído para lixiviar tal nutriente. O efeito da aplicação de calcário em T2 proporcionou maiores médias se comparados com os outros tratamentos durante todo o restante do período coletado.

Comparando os tratamentos T1, testemunha, e T3, que recebeu somente a aplicação de gesso, é possível verificar que T1 apresentou maiores médias da concentração de Mg do que T3 ao longo do tempo. Fica evidente que a ação do gesso, que é um condicionador, foi o fator que influenciou a lixiviação deste nutriente. Esse fato apresentou-se ao longo do tempo de duração deste experimento.

Contudo, nos tratamentos em que a densidade foi maior a ação do gesso não se manifestou como pode ser visto nos tratamentos T3/3P e T4/3P, mas principalmente nos tratamentos T3/5P e T4/5P. Nesse sentido, a compactação do

solo contribuiu para que o nutriente Mg não fosse lixiviado. Vale lembrar que a compactação proporcionou não a lixiviação do mesmo ao longo do tempo também.

A aplicação de calcário possibilitou incrementar até 76,06% de Mg da quantidade da concentração inicial como pode ser visto no tratamento T4/1P, sendo que a média geral, considerando todas as camadas, passou de 1,42 $cmol_c/cm^3$ para 2,50 $cmol_c/cm^3$. Logo, a aplicação de calcário conseguiu cumprir com a sua exigência de adicionar Mg (MALAVOLTA, 2005).

Em relação aos dados, as concentrações de Mg encontradas apresentaram alta variabilidade, sendo: CV = 28,52 % (camada 0,0 – 0,05 m); CV = 28,74 % (camada 0,05 – 0,1 m); CV = 35,99 % (camada 0,1 – 0,2 m); e CV = 50 % (camada 0,2 – 0,4 m). Resultados maiores que 30 % para CV possuem dispersão elevada, indicando heterogeneidade dessa variável na área de estudo (GOMES, 1990).

A seguir, nas Figuras 11 e 12, encontram-se os gráficos gerados por meio do ajuste matemático do movimento do nutriente Mg no perfil do solo.

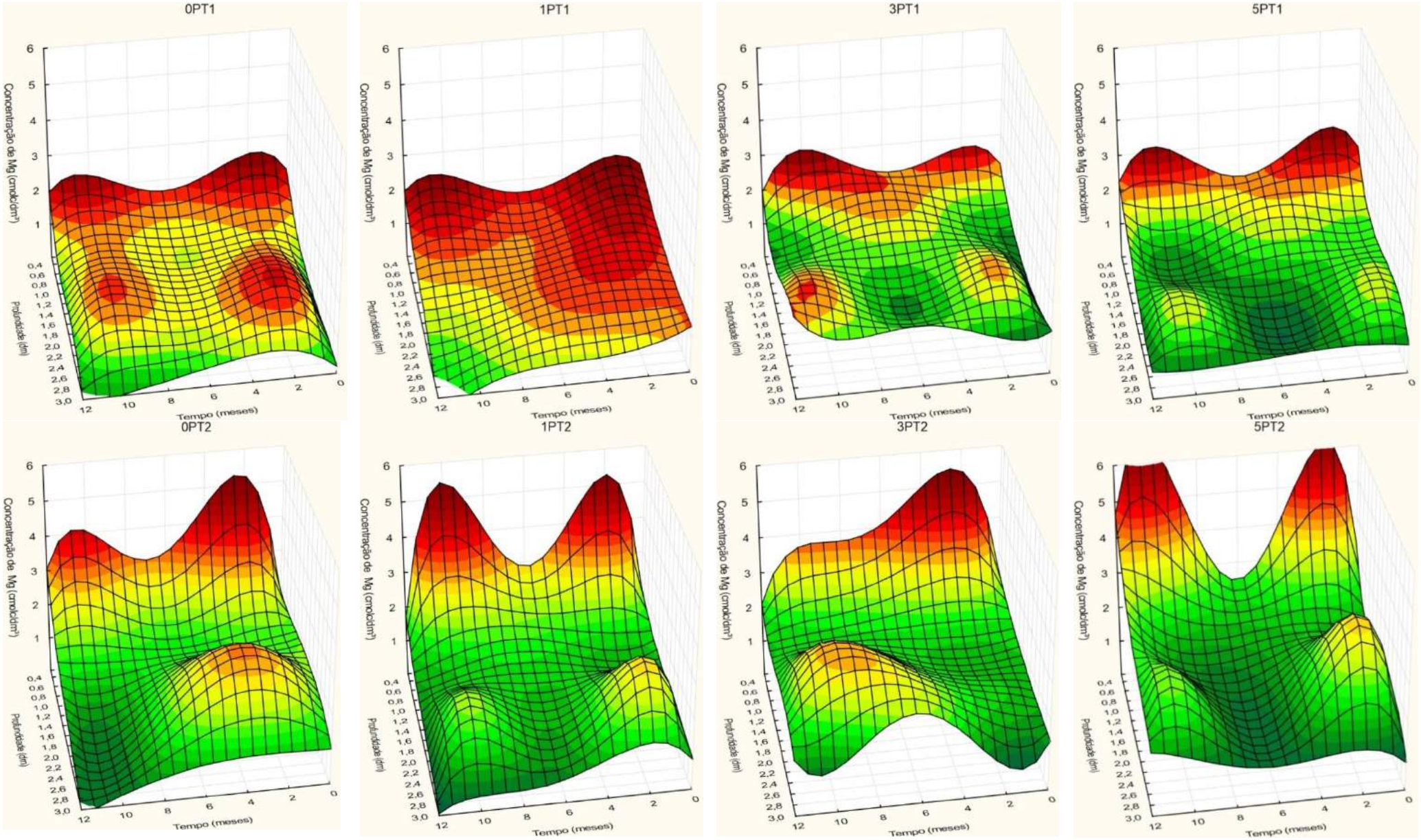

Figura 11. Concentração de Mg no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT1, 1PT1, 3PT1, 5PT1, 0PT2, 1PT2, 3PT2 e 5PT2).

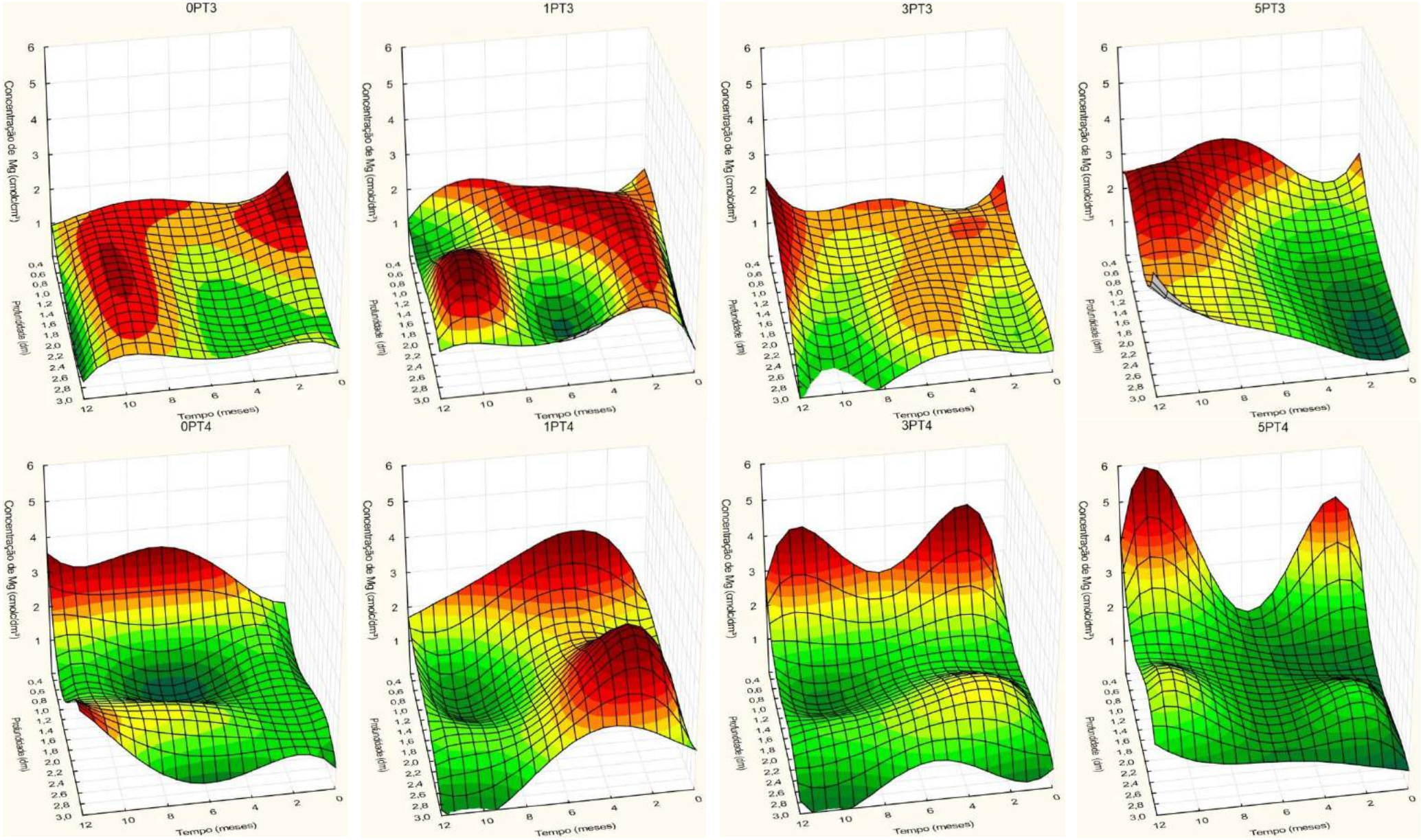

Figura 12. Concentração de Mg no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT3, 1PT3, 3PT3, 5PT3, 0PT4, 1PT4, 3PT4 e 5PT4).

É nítido nas imagens como os tratamentos T2/0P, T21P, T2/3P e T2/5P que possuem maiores concentrações de Mg por conta da incorporação do calcário. As segundas maiores médias são encontradas nos tratamentos T4/0P, T4/1P, T4/3P, T4/5P, os quais também tiveram essa incorporação. Como já dito, o gesso aplicado nesses tratamentos influenciou na lixiviação.

Assim como neste trabalho, Zambrosi et al. (2007), Soares (2016) e Rezende (2018) verificaram que ocorreu lixiviação do Mg^{2+} com a utilização do gesso agrícola, pois o Ca^{2+} presente substitui o Mg^{2+} nas cargas negativas do solo, bem como a presença do sulfato forma pares iônicos com o Mg^{2+} e favorece a lixiviação desse cátion na forma de $MgSO_4$.

Contudo, os tratamentos T4's possuem maior uniformidade na concentração do nutriente Mg ao longo do perfil do solo, estando mais bem distribuído. Essa situação não é identificada nos tratamentos T2's, que possuem uma maior concentração nas camadas mais superficiais do solo.

Os menores valores da concentração de Mg são vistos nos tratamentos T3's seguidos de T1's. Os tratamentos T1's ainda apresentam maiores concentrações que T3's, pois não houve a aplicação de gesso. O gesso contribuiu possivelmente com a descida do Mg ali presente.

É possível observar que, no tocante à compactação do solo, tratamentos que receberam 3 e 5 passadas (3P e 5P) são os que possuíram menores concentrações deste nutriente em camadas mais profundas. Entende-se que a compactação dificultou a normal descida do mesmo em ambientes nos quais o gesso esteve presente.

4.5. Movimentação do potássio

A Tabela 11 apresenta os valores médios de K ($cmol_c cm^{-3}$) das camadas de 0-0,1; 0,1-0-0,2 e 0,2-0,3 m aos 0, 3, 6, 9 e 12 meses após a instalação do experimento K.

Estatisticamente por meio da Anova as médias de T1/0P, T1/1P, T1/3P, T1/5P, T2/3P, T3/0P, T3/1P, T4/0P, T4/1P não diferiam significativamente entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade, em relação à mudança de

concentração de K no tempo. A respeito da concentração de K nos diferentes tratamentos, pode-se dizer que ocorreram diferenças significativas.

Tabela 11. Valores médios de K ($cmol_c cm^{-3}$) das camadas de 0-0,1; 0,1-0-0,2 e 0,2-0,3 m aos 0, 3, 6, 9 e 12 meses após a instalação do experimento.

	Meses após a implantação do experimento				
Tratamento	**0**	**3**	**6**	**9**	**12**
			Camada 0-0,05 m		
T1/0P	0,67 A	0,45 A	0,74 a	0,46 a	0,64 cde
T1/1P	0,54 A	0,33 A	0,59 a	0,44 a	0,66 bcde
T1/3P	0,57 A	0,33 A	0,53 a	0,42 a	0,60 cde
T1/5P	0,81 a AB	0,41 a B	0,46 a AB	0,45 a B	0,89 abcde A
T2/0P	0,69 a AB	0,29 a BC	0,77 a A	0,23 a C	0,56 de ABC
T2/1P	0,54 a B	0,24 a B	0,58 a B	0,37 a B	1,21 ab A
T2/3P	0,69 A	0,31 A	0,56 a	0,52 a	0,67 bcde
T2/5P	0,78 a AB	0,35 a B	0,40 a B	0,46 a B	1,15 abc A
T3/0P	0,55 a AB	0,18 a B	0,68 a A	0,52 a AB	0,76 abcde A
T3/1P	0,54 a AB	0,21 a B	0,47 a AB	0,35 a AB	0,71 bcde A
T3/3P	0,76 a A	0,26 a B	0,58 a AB	0,30 a B	0,91 abcde A
T3/5P	0,78 a B	0,39 a B	0,69 a B	0,47 a B	1,28 a A
T4/0P	0,40 a AB	0,14 a B	0,54 a AB	0,23 a B	0,77 abcde A
T4/1P	0,63 A	0,22 A	0,43 a	0,31 a	0,41 e
T4/3P	0,82 a AB	0,19 a C	0,56 a BC	0,50 a BC	1,07 abcd A
T4/5P	0,92 a A	0,37 a B	0,50 a AB	0,42 a B	0,73 abcde AB
DMS coluna	**0,55**				
DMS linha	**0,43**				
CV%	**28,57**				
			Camada 0,05-0,1 m		
T1/0P	0,57 abc	0,35 A	0,33 a	0,37 a	0,41 ab
T1/1P	0,58 abc A	0,26 a B	0,42 a AB	0,36 a AB	0,27 b B
T1/3P	0,44 abc	0,29 A	0,50 a	0,26 a	0,35 ab
T1/5P	0,38 abc	0,30 A	0,43 a	0,36 a	0,36 ab
T2/0P	0,49 abc A	0,27 a AB	0,49 a A	0,10 a B	0,30 ab AB
T2/1P	0,41 abc AB	0,19 a B	0,49 a AB	0,28 a AB	0,51 ab A
T2/3P	0,56 abc	0,30 A	0,44 a	0,46 a	0,32 ab
T2/5P	0,45 abc	0,36 A	0,31 a	0,38 a	0,54 ab
T3/0P	0,45 abc	0,20 A	0,36 a	0,21 a	0,34 ab
T3/1P	0,31 bc	0,22 A	0,26 a	0,23 a	0,21 b
T3/3P	0,53 abc	0,27 A	0,26 a	0,23 a	0,34 ab
T3/5P	0,50 abc AB	0,31 a B	0,45 a AB	0,45 a AB	0,65 a A
T4/0P	0,21 c	0,11 A	0,18 a	0,17 a	0,34 ab
T4/1P	0,32 bc	0,17 A	0,23 a	0,15 a	0,30 ab
T4/3P	0,72 a A	0,26 a B	0,37 a B	0,30 a B	0,31 ab B
T4/5P	0,63 ab A	0,37 a AB	0,18 a B	0,40 a AB	0,29 ab B

Tabela 11. Continuação.

DMS coluna	**0,38**									
DMS linha	**0,299**									
CV%	**30,79**									
					Camada 0,1-0,2 m					
T1/0P	0,34		0,27	ab	0,22	ab	0,35	ab	0,33	
T1/1P	0,39		0,25	ab	0,37	ab	0,27	ab	0,22	
T1/3P	0,30		0,24	ab	0,36	ab	0,22	ab	0,26	
T1/5P	0,29		0,23	ab	0,22	ab	0,22	ab	0,25	
T2/0P	0,49	A	0,30	ab ABC	0,36	ab AB	0,08	b C	0,22	BC
T2/1P	0,32	AB	0,23	ab B	0,48	a A	0,26	ab AB	0,44	AB
T2/3P	0,45		0,28	ab	0,31	ab	0,42	a	0,26	
T2/5P	0,40		0,32	ab	0,21	ab	0,36	ab	0,28	
T3/0P	0,35		0,22	ab	0,28	ab	0,17	ab	0,22	
T3/1P	0,23		0,25	ab	0,18	ab	0,14	ab	0,14	
T3/3P	0,39		0,31	ab	0,22	ab	0,17	ab	0,23	
T3/5P	0,35		0,26	ab	0,29	ab	0,42	a	0,44	
T4/0P	0,20		0,08	b	0,14	b	0,19	ab	0,13	
T4/1P	0,23		0,24	ab	0,18	ab	0,10	b	0,22	
T4/3P	0,49	A	0,42	a AB	0,26	ab AB	0,22	ab B	0,18	B
T4/5P	0,44	A	0,37	ab AB	0,08	b C	0,22	ab ABC	0,18	BC
DMS coluna	**0,31**									
DMS linha	**0,24**									
CV%	**31,84**									
					Camada 0,2-0,4 m					
T1/0P	0,19		0,18	abc	0,17	ab	0,15		0,26	abc
T1/1P	0,28		0,18	abc	0,23	ab	0,22		0,15	bc
T1/3P	0,32	A	0,18	abc AB	0,29	ab AB	0,13	B	0,23	abc AB
T1/5P	0,17		0,09	bc	0,17	ab	0,14		0,15	bc
T2/0P	0,26		0,23	abc	0,29	ab	0,12		0,21	abc
T2/1P	0,23	AB	0,13	abc B	0,31	a AB	0,22	AB	0,40	a A
T2/3P	0,33		0,17	abc	0,26	ab	0,26		0,21	abc
T2/5P	0,18		0,16	abc	0,14	ab	0,19		0,19	abc
T3/0P	0,19		0,19	abc	0,24	ab	0,13		0,17	abc
T3/1P	0,12		0,18	abc	0,17	ab	0,17		0,10	c
T3/3P	0,27		0,25	abc	0,18	ab	0,12		0,26	abc
T3/5P	0,23		0,20	abc	0,22	ab	0,27		0,35	ab
T4/0P	0,10		0,07	c	0,17	ab	0,16		0,13	bc
T4/1P	0,12		0,18	abc	0,13	ab	0,09		0,12	bc
T4/3P	0,32		0,35	a	0,23	ab	0,19		0,17	abc
T4/5P	0,32	A	0,31	ab A	0,07	b B	0,17	AB	0,12	bc B
DMS coluna	**0,23**									
DMS linha	**0,18**									
CV%	**33,64**									

Médias seguidas de letras, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

Os resultados da concentração média de K estão de acordo com o verificado para latossolos argilosos. Além disso, estão em conformidade com os resultados de análises químicas de amostras de solo, coletadas em diferentes profundidades, considerando as doses de calcário, antes da reaplicação de calcário na superfície em sistema plantio direto do estudo de Caires et al. (2002).

Considerando a primeira camada coletada (0,0-0,05 m), todos os tratamentos não apresentaram diferenças estatísticas nos meses coletados: 0, 3, 6 e 9. Somente nos 12 meses de coleta diferenças foram identificadas, visto que a maior concentração de K foi observada no tratamento T3/5P. Tomando a variável tempo em cada tratamento, somente os tratamentos T1/0P, T1/1P, T1/3P, T2/3P e T4/1P não denotaram mudanças da concentração ao longo do tempo. As maiores concentrações de K normalmente foram observadas nos 12 meses de coleta.

A respeito da segunda camada coletada, a concentração de K entre os tratamentos diferiu dos 0 meses de coleta e aos 12, quando as maiores médias de concentração foram observadas nos tratamentos T4/3P e T3/5P, respectivamente. Considerando a mudança da concentração em relação ao tempo, os tratamentos T1/1P, T2/0P, T2/1P, T3/5P, T4/3P e T4/5P foram estatisticamente distintos.

A camada de 0,1-0,2 m de profundidade exibiu diferenças nas concentrações médias dos tratamentos nos meses de 3, 6 e 9 coletados. As maiores médias foram encontradas nos tratamentos que receberam a aplicação de calcário.

Assim, quando a disponibilidade de Ca e de Mg são elevadas em relação à disponibilidade de K, por conta da calagem, a absorção deste último por parte das plantas é reduzida pela competição entre os três cátions. Entretanto, a calagem pode aumentar a disponibilidade de K no solo aumentando, assim, a sua absorção pela planta (MASCARENHAS et al., 2000)

Observando a concentração de K no tempo e na camada de 0,1-0,2 m, somente os tratamentos T2/0P, T1/1P, T4/3P e T4/5P foram estatisticamente distintos. A diferença nestes tratamentos pode ser meramente ao acaso.

Na última camada coletada (0,2-0,4 m), os tratamentos apresentaram diferenças estatísticas aos 3, 6 e 12 meses de coleta. As maiores médias foram identificadas nos tratamentos, T4/3P, T2/1P e T2/1P, respectivamente. O tempo em cada tratamento foi o fator que diferenciou somente nos tratamentos T1/3P, T2/1P e T4/5P.

As concentrações de K encontradas apresentaram alta variabilidade, sendo: CV = 28,57 % (camada 0,0 – 0,05 m); CV = 30,79 % (camada 0,05 – 0,1 m); CV = 31,84 % (camada 0,1 – 0,2 m); e CV = 33,64 % (camada 0,2 – 0,4 m); (GOMES, 1990).

Em geral, como o nutriente K não é incrementado com a aplicação de calcário e gesso, vemos que a suas concentrações médias na primeira coleta (0 meses) estão altas se comparadas com as concentrações da segunda coleta aos 3 meses.

Por K ser um macronutriente, ele acaba sendo muito requerido pelas culturas apresentando alta mobilidade no solo. Logo, pode-se inferir que a planta absorveu este nutriente ou que sofreu lixiviação para camadas mais profundas que as camadas avaliadas.

Seguindo tal pensamento, vemos que, aos 6 meses de coleta, os valores da concentração de K no solo estão maiores em razão do resto da palhada deixada após a colheita da cultura implantada.

Aos 9 meses, os valores da concentração de K retornam a decrescer, o que pode ser explicado novamente por sua utilização pela cultura implantada. Aos 12 meses, esse valor tende a aumentar pelo processo que forneceu os restos da cultura anterior.

A seguir, nas Figuras 13 e 14, encontram-se os gráficos gerados por meio do ajuste matemático do movimento do nutriente K no perfil do solo. Tais gráficos contemplam a concentração de K ao longo do tempo relacionada com a concentração no perfil do solo.

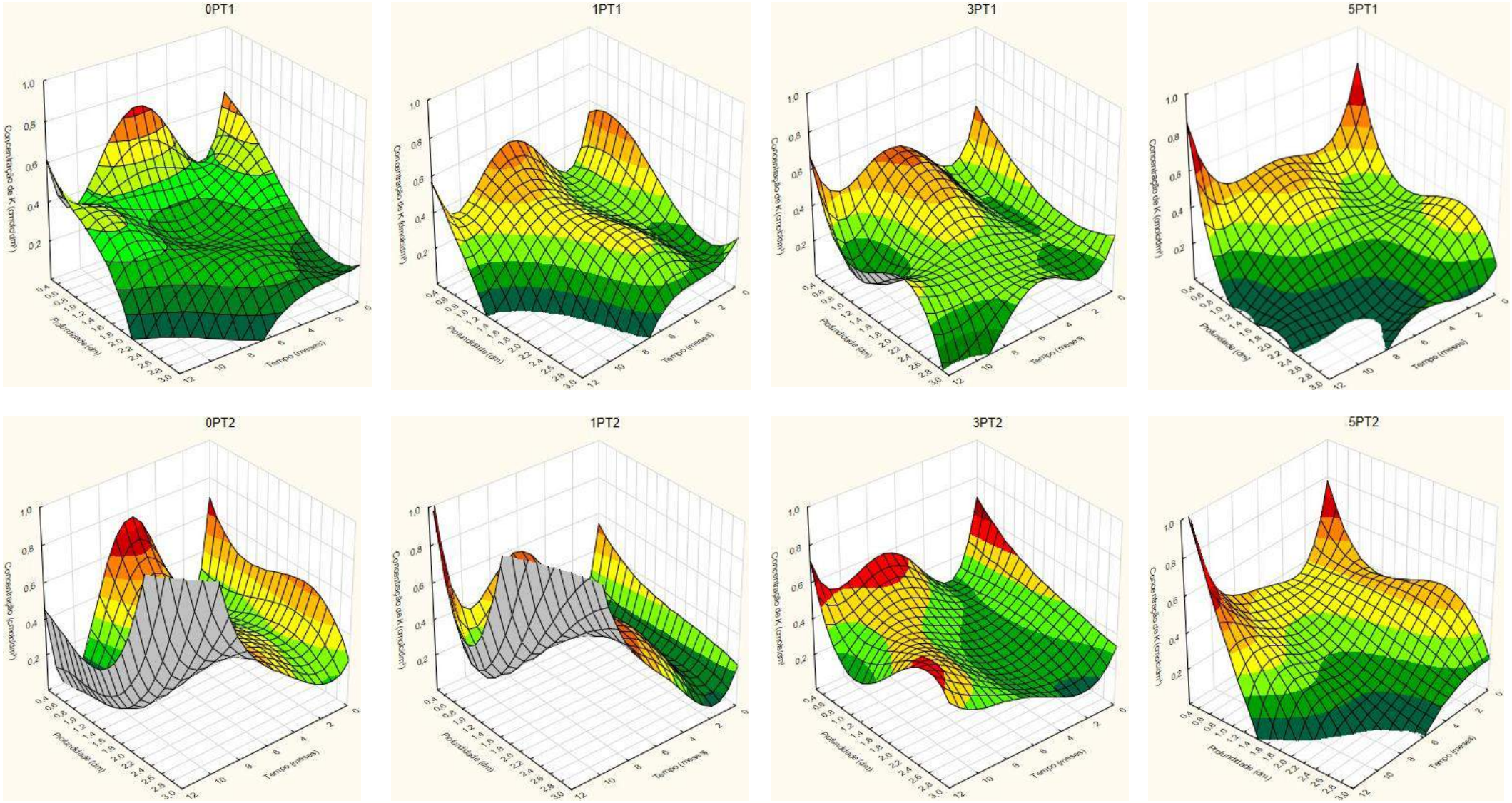

Figura 13. Concentração de K no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT1, 1PT1, 3PT1, 5PT1, 0PT2, 1PT2, 3PT2 e 5PT2).

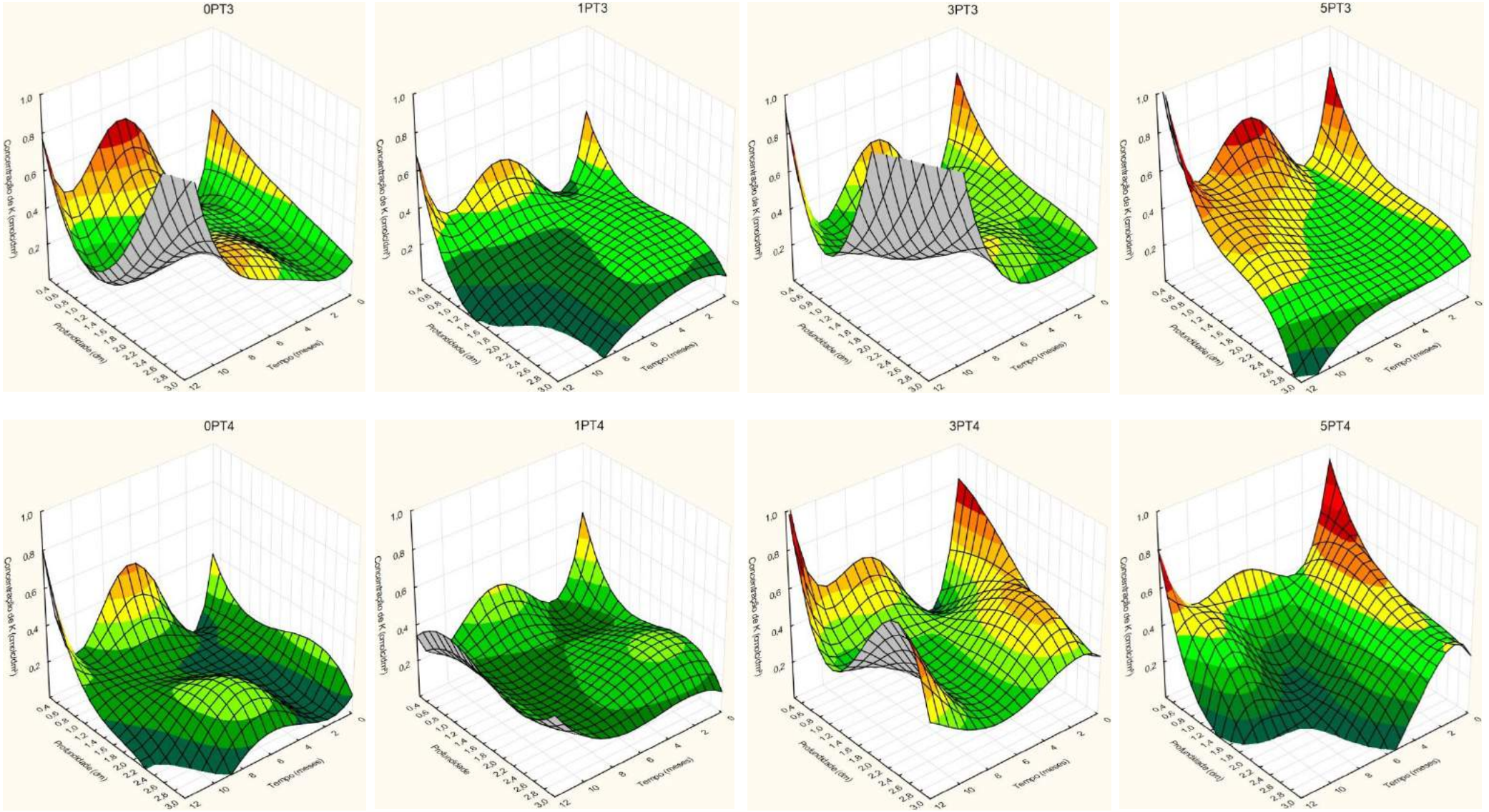

Figura 14. Concentração de K no perfil do solo ao longo do tempo de cada tratamento (0PT3, 1PT3, 3PT3, 5PT3, 0PT4, 1PT4, 3PT4 e 5PT4).

Identifica-se que os tratamentos nos quais houve compactação, a concentração do nutriente K foi praticamente nula próximo aos 12 meses de coleta, ou seja, a presença de alta densidade ao longo do tempo não proporcionou este nutriente nas camadas mais profundas.

O efeito da calagem sobre a aplicação do K, muitas vezes, conduz a uma elevação na fixação. Portela e Abreu (2018) verificaram que, nos 12 solos com $pH_{H2O} \leq 5,5$, quando submetidos a calagem, não ocorreram alterações assinaláveis na fixação do K, com exceção de dois solos (solos com média e alta capacidade de fixação) em que se observou um aumento da fixação do K de 51% para 66% e de 70% para 83%, respectivamente.

Na verdade, o que aconteceu com mais frequência foi o inverso, isto é, houve diminuição da fixação do K em metade dos solos (solos nulos, baixos e médios de potencial de fixação de K). Ou seja, o K passou de uma forma não permutável para uma forma acessível às plantas.

Efetivamente, nos solos ácidos submetidos a calagem houve um aumento do K de troca e diminuição do K em solução e, consequentemente, aumentou o poder tampão desses solos, diminuindo, assim, a sua susceptibilidade à lixiviação do K (PORTELA; ABREU, 2018).

Zardetto (2011) teve em seu trabalho o objetivo de avaliar a dosagem em tonelada por alqueire que se pode utilizar do gesso agrícola sem que prejudique o solo. Por meio desta premissa, ele concluiu que a movimentação do potássio parece não sofrer com o excesso de gesso.

Características curiosas foram identificadas nos tratamentos 0PT2, 1PT2, 0PT3 e 3PT3 nos quais ao longo do tempo, especificamente aos 12 meses, a concentração de K esteve maior do que em qualquer outro momento de coleta nas camadas mais profundas do solo, ultrapassando a concentração de 1,0 $cmol_c dm^{-3}$.

O potássio que se encontra em componentes não estruturais e na forma iônica no vacúolo das células das plantas, é rapidamente lixiviado logo após o manejo das plantas de cobertura, com pequena dependência dos processos microbianos. Nesse sentido, a maior parte do K dos resíduos culturais das plantas de cobertura é liberada logo após o manejo das espécies, principalmente cultivares como a aveia preta (GIACOMINI et al., 2003).

4.6. Componentes de produção da cultura da soja

A Tabela 12 apresenta os valores médios dos componentes de produção da cultura da soja na safra de 2018. Por meio da Anova, verificou-se que somente no quesito altura de planta e peso de 10 grãos apresentaram diferença estatística em nível de 5% de probabilidade por meio do teste de Tukey.

Tabela 12. Valores médios de altura de plantas, número de plantas, rendimento de grãos e peso de cem grãos da cultura da soja, safra 2018.

Tratamento	Altura de Planta (cm)		Número de Plantas	Rendimento de grãos (t ha^{-1})	Peso 100 grãos (g)	
T1/0P	99,00	ab	109,00	4,92	16,65	ab
T2/0P	101,25	ab	112,00	5,01	16,11	abc
T3/0P	102,58	ab	112,33	5,13	17,18	A
T4/0P	92,83	b	111,00	5,05	16,49	Ab
T1/1P	102,00	ab	106,33	5,21	15,42	bc
T2/1P	97,17	ab	107,67	4,96	15,96	abc
T3/1P	100,17	ab	112,33	4,93	15,41	bc
T4/1P	99,42	ab	111,67	4,97	15,35	bc
T1/3P	93,17	b	105,00	4,84	14,58	bc
T2/3P	99,50	ab	105,67	5,31	15,91	abc
T3/3P	103,67	ab	111,33	5,45	15,89	abc
T4/3P	102,25	ab	105,33	5,33	16,37	Ab
T1/5P	105,33	a	111,33	4,93	15,21	bc
T2/5P	107,17	A	104,00	5,24	15,77	abc
T3/5P	105,83	A	110,67	5,44	16,31	Ab
T4/5P	105,67	A	105,67	5,27	16,25	Abc

Médias de tratamentos seguidas por letras distintas na coluna diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 5% de significância.

Observando a influência dos tratamentos que envolvem a aplicação de gesso e calcário, maiores médias de quantidade de plantas são apresentadas nos tratamentos T3 em todos os níveis de compactação.

Avaliando o quesito rendimento de grãos t $há^{-1}$, verificou-se que não houve diferença estatística entre os tratamentos, considerando os diferentes níveis de compactação e as aplicações de calcário e gesso. O grau de compactação gerado pelo rolo compactador foi menor de 64% nos diferentes níveis, não chegando a obter

uma densidade crítica para as culturas em solos argilosos, foi um fator que pode não ter influenciado diferenças entre os tratamentos.

O fator principal para tais resultados está nas vantagens que o sistema plantio direto proporciona. A maior umidade que ocorre nas camadas superficiais do solo, graças a cobertura vegetal que reduz as perdas por evaporação, proporcionando adequada absorção de nutrientes pelas plantas, mesmo em condições de elevada acidez, corroborando para melhores índices de produtividade de grãos (CAIRES, 2013).

Resultados análogos foram encontrados por Guedes Júnior (2017), levando em conta que o coeficiente de variação dos tratamentos, que envolveu diferentes doses de gesso agrícola, foi 3,75%, ou seja, não apresentando diferenças estatísticas entre as médias. Caires et al. (2003) também não obtiveram respostas significativas do efeito das aplicações de calcário e gesso no rendimento de grãos.

Como Guedes Júnior (2017) aponta, o motivo dos tratamentos que envolvem aplicações de gesso não terem dado resultados significativos tem a ver com os aspectos favoráveis ao desenvolvimento da soja, que leva em conta a boa estrutura do solo no sistema plantio direto, a quantidade de matéria orgânica e condições climáticas do período.

A Figura 1 apresenta os dados de temperatura, precipitação pluviométrica e temperatura média da cultura da soja no período de outubro a fevereiro, nos anos de 2017 e 2018. As recomendações indicam que a soja se adapta melhor às regiões nas quais as temperaturas oscilam entre 20°C e 30°C sendo que a temperatura ideal para seu desenvolvimento está em torno de 30°C. Além disso, a necessidade total de água na cultura da soja, para obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 a 800 mm/ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração de seu ciclo (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

Verifica-se, por meio da Figura 1, que os aspectos ecofisiológicos de precipitação e temperatura do período em que a soja esteve implantada a campo estavam adequados para a obtenção de bons índices de produtividade.

Ao avaliar a aplicação superficial de calcário e gesso em um Latossolo vermelho, Costa (2015) verificou que, para a cultura do milho, a massa de 100 grãos foi 11% maior nos tratamentos com calagem e 7% no gesso em relação à testemunha, sem aplicação deles. Por meio da Tabela 11, identificou-se que o

tratamento que obteve a maior média quanto à massa de 100 grãos foi o 0PT3, com o valor de 17,18 gramas. A seguir, é apresentado o Boxplot (Figura 15) dos mesmos dados.

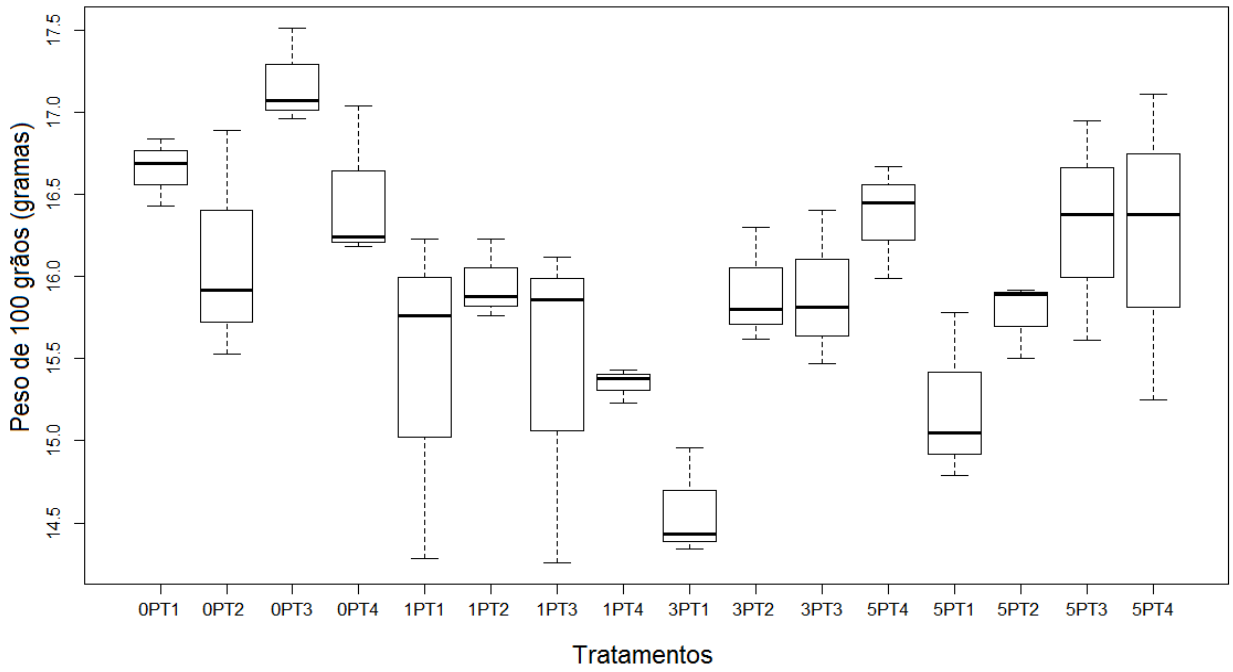

Figura 15. Boxplot da massa de 100 grãos de soja (gramas) considerando os tratamentos.

Por meio do gráfico Boxplot verifica-se a distribuição dos dados. No tocante à massa de 100 grãos (gramas), a menor variância dos dados se deu em 1PT4, assim como a maior se deu em 5PT4. Observa-se que as medianas não se encontram muito próximas. Entretanto, os dados apresentam variâncias um tanto próximas, a exceção dos tratamentos 0PT2; 1PT1; 1PT3, 5PT3 e 5PT4.

5. CONCLUSÕES

A aplicação do gesso agrícola após a aplicação do calcário favoreceu o movimento descendente dos íons Ca e Mg para camadas mais profundas do perfil do solo;

À medida que aumentou o estado de compactação do solo, de zero passadas para 5 passadas do rolo compactador, a movimentação dos íons Ca, Mg e K no perfil do solo foi reduzida.

Não houve diferença significativa para o rendimento de grãos de soja entre os tratamentos avaliados, evidenciando às ideais condições estruturais e de fertilidade do solo da área experimental.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um Latossolo Bruno alumínico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 963-975, 2005.

ALVES, O. F. et al. Características agronômicas de cultivares de sorgo em sistema de plantio direto no semiárido de Pernambuco. **Revista Ciência Agrícola**, Rio Largo, AL, v. 14, n. 1, p. 29-36, 2017.

AMADO, T.J.C. et al. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 189-197, 2001.

AMARAL, L. A. et al. Efeito de doses de gesso agrícola na cultura do milho e alterações químicas no solo. **Agrarian**, Dourados, v. 10, n. 35, p. 31-41, 2017.

BARBOSA FILHO, M. P.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P.. Atributos de fertilidade do solo e produtividade do feijoeiro e da soja influenciados pela calagem em superfície incorporada. **Embrapa Arroz e Feijão-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2005.

BARROSO, Leônidas Conceição et al. **Cálculo Numérico (com aplicações).** São Paulo: Harbra, v. 384, p. 2, 1987.

BAYER, C. BERTOL, I. Características químicas de um Cambissolo Húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n.1, p. 687-694, 1999.

BAYER, C. et al. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. **Soil and Tillage research**, v. 53, n. 2, p. 95-104, 2000.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 38, n. 7, p. 849-856, jul. 2003.

BEUTLER, A. N. et al. Influência da compactação e do cultivo de soja nos atributos físicos e na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho. **Irriga**, Botucatu, v. 8, n. 3, p. 242-249, 2018.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades do solo**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

BRESLER, E. Convective and pore scale dispersive solute transport in unsaturated heterogeneous fields. **Water Resources Research**, Washington, v.37, n.6, p.1.683-93, 1981.

BORGES, W. L. B. et al. Uso de calcário agrícola, gesso agrícola e cal hidratada agrícola em sistema agropastoril no noroeste paulista: efeitos na cultura da soja. **Nucleus**, Ituverava, v.3, n.1 p. 45-54, 2018.

BOSSOLANI, J. W. **Reaplicação superficial de calcário e gesso em sistema plantio direto: efeitos no solo e na sucessão de culturas**. 2018.

CAIRES, E. et al. Soybean yield and quality as a Function oF lime and gypsum applications**. Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 63, n. 4, p. 370-379, 2006.

CAIRES, E. F. et al. Crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, 2001.

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 3, p. 213-223, 2001.

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 357-364, 2002.

CAIRES, E. F. et al. Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição do milho de acordo com a calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 26, n. 4, 2002.

CAIRES, E.F. et al. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 275-86, 2003.

CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 125-136, 2004.

CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 45-53, 2011.

CAIRES, E. F. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. **Informações Agronômicas**, v. 141, n. 1, p. 1-13, 2013.

CHAVES, J.C. et al. Especiação química da solução do solo para interpretação da absorção de Ca e Al por raízes de cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, p.447- 453, 1991.

CIOTTA, M. N. et al. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** Campinas. v. 26, n. 4, p. 1055-1064, 2002.

COELHO, C. R. B. **Estudo Teórico e Experimental de Fluxo de Água e Transporte de Solutos em Equilíbrio e Não-Equilíbrio em Solos Tropicais. 2016**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

COSTA, M. J. et al. Atributos químicos e físicos de um Latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 5, 2007.

COSTA, N. D. L. et al. Resposta de Brachiaria brizantha cv. Xaraés a níveis de calagem. **PUBVET**, Londrina, v. 6, n. 13, p. 1338-1344, 2012.

COSTA, C. H. M. **Calagem superficial e aplicação de gesso em sistema plantio direto de longa duração: efeitos no solo e na sucessão milho/crambe/feijão-caupi.** Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. São Paulo, 2015.

COUTINHO, E. L. M. et al. Calagem e adubação potássica para o capim-tifton 85. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 3, p.101-111, 2014.

DEBIASI, H. et al. Sistemas de preparo do solo: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja. Londrina: **Embrapa Soja-Documentos (INFOTECA-E)**. Brasília, 2013.

DERPSCH, R. et al. **Controle da erosão no Paraná: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo**. Eschborn: GZT, 1991.

DO CARMO, D. L.; SILVA, C. A.. Condutividade elétrica e crescimento do milho em solos contrastantes sob aplicação de diversos níveis de calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 10, p. 1762-1772, 2016.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2. ed. Rio de Janeiro, **Embrapa Solos**, Brasília, p. 212, 1997.

EMBRAPA, SOJA. Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil 2000/01. **Londrina: Embrapa**, 2000.

EMBRAPA, SOLOS. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. **Embrapa,** Brasília, 2. ed., 2009.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, Brasília, 3. ed., 2013.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. 2005.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. **Embrapa Soja-Circular Técnica** (INFOTECA-E), 2007.

FREITAS, L. A. et al. Soil physical and phenological attributes of soybean in different management systems and gypsum. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias,** Recife, v. 12, n. 4, p. 508-515, 2017.

FIGUEIREDO, G. C. **Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2010.

GARAFFA, J. P. et al. Produtividade da cultura da soja em função de diferentes sistemas sulcadores de semeadura. In: **5ª MOEPEX**. 2016.

GARLET, L. C. **Melhoria dos atributos químicos do solo pelo uso de corretivos, condicionador e fertilizantes aplicados em superfície e incorporado com escarificador e a produtividade da soja**. Dissertação (Mestrado). Santa Maria, 2018.

GIACOMINI, S. J. et al. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 9, p. 1097-1104, 2003.

GOMES, P. C. et al. Produção, Composição Mineral e Nível Crítico de Ca no Rami (Boehmeria nivea Gaud) Cultivado em Solução Nutritiva. **Ceres**, Viçosa, v. 43, n. 247, 1996.

GUEDES JÚNIOR, F. A. **Gesso agrícola: efeitos no crescimento radicular e no rendimento de grãos da soja**. Dissertação (Mestrado). Cascavel, 2017.

HECKLER. I.C. et al. **Sistema plantio direto: o produtor pergunta, a EMBRAPA responde.** Brasília, DF: Embrapa-SPI; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 1998.

IAPAR - INSTITUTO AGRONOMICO DO PARANÁ. **Cartas Climáticas do Estado do Paraná.** Londrina: IAPAR, 2000.

JÚNIOR, J. B. C. et al. Equações e programa computacional para cálculo do transporte de solutos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 604-611, 2006.

JÚNIOR, J. B. C. et al. Efeitos de níveis de cobertura do solo sobre a produtividade e crescimento do feijoeiro irrigado, em sistema de plantio direto. **Irriga**, v. 12, n. 2, p. 177-184, 2018.

KOSTIC, L. et al. Liming of anthropogenically acidified soil promotes phosphorus acquisition in the rhizosphere of wheat. **Biology and Fertility of Soils**, v. 51, p. 289-298, 2015.

LANA, R. M. Q. et al. Soil physical attributes and productivity of sugarcane under different cropping systems in the savannah goiano. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 2, p. 149, 2017.

LARACH, J. O. I. et al. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná. **Embrapa Solos-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 1984.

LAWTON, K.; COELHO, M. A.; CRISÓSTOMO, L. A. Movimento e perdas por lixiviação de nutrientes solúveis aplicados a solos do Estado do Ceara, Brasil. **Ciência Agronômica**, 1978.

LI, Z. et al. Effects of liming on health and growth of young Schima superba trees under canopy of a Pinus massoniana stand damaged by soil acidification in Chongqing, China. **New Forests**, New York, v. 47, p. 801-813, 2016.

LIMA, M.; SIRTOLI, Â. **Diagnóstico e recomendações de manejo de solo: aspectos teóricos e metodológicos.** 2006.

LIMA, R. P. et al. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. **Biosystems engineering**, v. 162, p. 1-10, 2017.

LOPES, R. S. **Teores de macronutrientes e produtividade do milho em função de fontes e doses de enxofre em latossolo do cerrado**. 2017.

MAGGI, C. F. et al. Lixiviação de nutrientes em solo cultivado com aplicação de água residuária de suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, 2011.

MALAVOLTA, E. Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas. **Informações Agronômicas**, v. 111, n. 3, p. 10-11, 2005.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980. 251p.

MARIA, I. C. et al. Efeito da adição de diferentes fontes de Ca no movimento de cátions em colunas de solo. **Scientia Agrícola**, Maringá, v. 50, p. 87-98, 1993.

MASCARENHAS, H. A. A. et al. Calcário e potássio para a cultura de soja. **Scientia Agrícola**, 2000.

MAUS, V. W. **Modelagem computacional aplicada ao transporte de contaminantes em águas subterrâneas**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011.

MELLO, F. A. F. et al. **Fertilidade do Solo.** São Paulo: Nobel, 1983.

MOURA, E. G. et al. Management of a cohesive tropical soil to enhance rootability and increase the efficiency of nitrogen and potassium use. **Soil use and management**, v. 28, n. 3, p. 370-377, 2012.

NETO, B.; MEDEIROS, A. **Calagem na cultura da fisalis**. 2017. Dissertação de Mestrado. UFVJM.

NUNES, M. R.; LEAL, J. R.; VELLOSO, A. C. Efeito da vinhaça na lixiviação de nutrientes do solo. III. K, Ca e magnésio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 3, p. 371-374, 1982.

PARIZOTTO, C.; PANDOLFO, C. M.; VEIGA, M.. Calcário de conchas, calcário calcítico e gesso na linha de semeadura e seu efeito sobre o rendimento de grãos das culturas. **Unoesc & Ciência-ACET**, Joaçaba, v. 9, n. 2, p. 115-120, 2018.

GOMES, F. P. **Curso de Estatística Experimental.** 13. ed. Piracicaba: Nobel, 1990.

PIZARRO, M. L. P. **Simulação de fluxo de água e transporte de solutos na zona não-saturada do solo pelo método de elementos finitos adaptativo**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PORTELA, E.; ABREU, M. M. Fixação do K nos solos portugueses. **Revista de Ciências Agrárias**, Recife, v. 41, n. 3, p. 11-20, 2018.

RABOIN, L. M. et al. Improving the fertility of tropical acid soils: Liming versus biocharapplication: A long term comparison in the highlands of Madagascar. **Field Crops Research**, Bethesda, n.199, p. 99-108, 2016.

RAIJ, B. V. Reações de gesso em solos ácidos. **Seminário sobre o uso do gesso na agricultura**, v. 2, p.106- 119, 1992.

RAS. **Regras para análise de sementes**. 1 ed. Brasília : Mapa/ACS, 2009.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v.27, p.29-48, 2003.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009.

RESENDE, H. O. **Efeito residual da gessagem e adubação fosfatada na cultura do milho segunda safra**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2018.

ROCHA, G. N.; GONÇALVES, J. L. M.; MOURA, I. M. Mudanças da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de Eucalyptus grandis fertilizado com biossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, 2004.

RODRIGHERO, M.; BARTH, G.; CAIRES, E. F.. Aplicação superficial de calcário com diferentes teores de Mge granulometrias em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 6, 2015.

ROSSI, P.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N. Curvas de distribuição de efluentes do íon nitrato em amostras de solo deformadas e indeformadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 675-682, 2007.

SÁ, J. C. M.; EMBRAPA DCNPT; FUNDACEP DFECOTRIGO. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. **Plantio direto no Brasil**, 1993.

SANTOS, A. B.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.12-16, 2002.

SANTOS, J. A. et al. Special liming materials for acidity control of soils with variable charge. **African Journal of Agricultural Research,** Nigeria, v. 11, n. 31, p. 2920-2936, 2016.

SANTOS, T. R. et al. Impacto da densidade do solo sobre o crescimento de variedades de milheto. **Multi-Science Journal**, v. 1, n. 13, p. 1-4, 2018.

SARMENTO, P.; CORSI, M.; CAMPOS, F. P. de. Eficiência do fosfato natural de Gafsa associado à calagem e gesso e sintomas nutricionais da alfafa, Medicago sativa L. **Acta Scientiarum,** Maringá, v. 24, n. 4, p. 1155-1161, 2002.

SCOPEL, I. et al. Infiltração de água e potencial de uso de solos muito arenosos nos cerrados (savanas) do brasil. **Boletim Goiano de Geografia,** Goiânia, v. 33, n. 2, p. 203-219, 2013.

SECCO, D.; ROS, C. O. J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividades de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 407-414, 2005.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, M. R. et al. Acumulação de nutrientes e produção forrageira de aveia e azevém em função da aplicação de calcário e gesso em superfície. **Revista de Ciências Agrárias,** Recife, v. 38, n. 3, p. 346-356, 2015.

SOUSA, R. M. et al. Eficiência no uso dos nutrientes em solos tropicais propensos à coesão: alternativas de manejo. **Acta Tecnológica**, Maranhão, v. 12, n. 2, p. 61-72, 2018.

SOARES, G. F. **Gesso e fósforo na sucessão soja/milho safrinha**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás, Jataí. 2016.

STATSOFT, INC. Statistica (data analysis software system), version 10. 2011.

VALADÃO, F. C. D. A. et al. Teor de macronutrientes e produtividade da soja influenciados pela compactação do solo e adubação fosfatada. **Revista de Ciências Agrárias**, Recife, v. 40, n. 1, p. 183-195, 2017.

VELOSO, C. A. C. et al. Efeito de diferentes materiais no pH do solo. **Scientia Agrícola,** Maringá, v. 49, n. 1, p. 123-128, 1992.

VISCHI FILHO, O. J. et al. Physical attributes and limiting water range as soil quality indicators after mechanical harvesting of sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, Austrália, v. 11, n. 2, p. 169, 2017.

WADT, P. G. S.; WADT, L. H. O. Movimentação de cátions em amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo incubadas com duas fontes de Ca. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1157-1164, 1999.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. Lixiviação de K em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, p. 2297-2305, 2008.

ZAMBROSI, F.C.B.; ALLEONI, L.R.F.; CAIRES, E.F. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, p. 110-117, 2007.

ZANDONÁ, R. R. et al. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja1. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 2, 2015.

ZARDETTO, L. R. **Avaliação do arraste dos elementos Cálcio, Magnésio e Potássio pela aplicação em excesso de gesso agrícola no solo.** (Trabalho de Conclusão de Curso). Assis, 2011.