

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - PPGA
MESTRADO

FERTILIDADE DO SOLO, NUTRIÇÃO DE PLANTAS, PRODUÇÃO DE GRÃOS E
RENDA ACUMULADA EM FUNÇÃO DE DOSES E PARCELAMENTOS DE GESSO
AGRÍCOLA EM PLANTIO DIRETO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MARCELO VICENSI

GUARAPUAVA-PR

2015

MARCELO VICENSI

**FERTILIDADE DO SOLO, NUTRIÇÃO DE PLANTAS, PRODUÇÃO DE GRÃOS E
RENDA ACUMULADA EM FUNÇÃO DE DOSES E PARCELAMENTOS DE GESSO
AGRÍCOLA EM PLANTIO DIRETO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller
Orientador

GUARAPUAVA-PR

2015

Catálogo na Publicação
Biblioteca Central da Unicentro, Campus Cedeteg

V632f Vicensi, Marcelo
Fertilidade do solo, nutrição de plantas, produção de grãos e renda acumulada em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola em plantio direto / Marcelo Vicensi. -- Guarapuava, 2015
xiv, 54 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, 2015

Orientador: Marcelo Marques Lopes Müller
Banca examinadora: Adilson de Oliveira Junior, Leandro Rampim, Cristiano André Pott

Bibliografia

1. Agronomia. 2. Sulfato. 3. Cálcio. 4. Condicionador. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

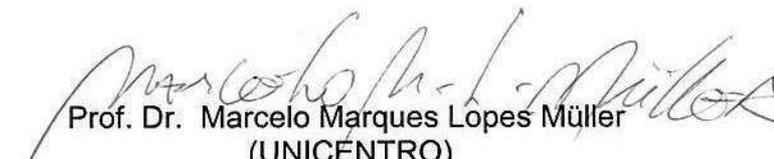
CDD 631.8

Marcelo Vicensi

**FERTILIDADE DO SOLO, NUTRIÇÃO DE PLANTAS, PRODUÇÃO DE GRÃOS E
RENDA ACUMULADA EM FUNÇÃO DE DOSES E PARCELAMENTOS DE GESSO
AGRÍCOLA EM PLANTIO DIREITO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 23 de fevereiro de 2015.



Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller
(UNICENTRO)



Dr. Adilson de Oliveira Júnior
(EMBRAPA)



Prof. Dr. Leandro Rampim
(UNICENTRO)



Prof. Dr. Cristiano André Pott
(UNICENTRO)

GUARAPUAVA-PR

2015

Dedico esta dissertação à
minha família, meus pais Neri José
e Rosa Helena e minha irmã Maiara,
por todo o incentivo recebido e por
sempre estarem ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Queria agradecer primeiramente à Deus, por ter me dado saúde, força e sabedoria para buscar meus objetivos;

À minha família, em especial meu pai Neri José, minha mãe Rosa Helena e minha irmã Maiara por toda a ajuda e palavras de incentivo durante esta caminhada;

Aos meus professores, especialmente ao Prof. Marcelo Marques Lopes Müller que sempre esteve disposto a passar suas experiências e conhecimentos no cargo de orientador;

A meus amigos Ronaldo do Nascimento, André Zeist, Wellington Umeda, Evandrei Rossi, João Igor Sousa, Omar Possatto, Mailson Poczynek, Diego Munhoz, Leandro Michalovicz, Lucas Otto e Simone Freiria, pelo companheirismo e ajuda durante o período do mestrado.

Ao grupo de Fertilidade do Solo, André Almeida, Christian Lopes, Eliton Ianisk, Julio Vidigal, Tales Galina e Alex Benask, que de alguma forma contribuíram na realização deste trabalho, seja pela coleta de dados e condução de experimentos, seja pela amizade construída nesse período;

Aos funcionários da UNICENTRO, em especial ao Elias, Ângelo e Marcos, que sempre estavam dispostos a realizar os trabalhos de campo e manutenção de equipamentos, sem os quais não poderia trabalhar.

À UNICENTRO, Universidade em que fiz a graduação e o mestrado, pela disponibilidade de instalações para a realização da pesquisa.

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

A todos que não foram mencionados, porém foram essenciais nessa etapa da minha vida, e tornaram possível a concretização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	vi
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. CAPÍTULO I - FERTILIDADE DO SOLO E RESPOSTAS DE MILHO, TRIGO E SOJA EM FUNÇÃO DE DOSES DE GESSO AGRÍCOLA COM E SEM PARCELAMENTO EM PLANTIO DIRETO.....	4
3.1. Resumo.....	4
3.2. Abstract.....	5
3.3. Introdução.....	6
3.4. Material e Métodos.....	7
3.5. Resultados e Discussão.....	10
3.5.1. Atributos químicos da fertilidade do solo.....	10
3.5.2. Teores de macronutrientes no tecido foliar das culturas.....	17
3.5.3. Produtividade das culturas.....	21
3.6. Conclusões.....	23
4. CAPÍTULO II - DOSES E PARCELAMENTOS DE GESSO AGRÍCOLA EM PLANTIO DIRETO: FERTILIDADE DO SOLO, RESPOSTAS DO MILHO, PRODUTIVIDADE E RENDA ACUMULADAS APÓS OITO CULTIVOS.....	25
4.1. Resumo.....	25
4.2. Abstract.....	26
4.3. Introdução.....	27
4.4. Material e Métodos.....	28
4.5. Resultados e Discussão.....	30
4.5.1. Atributos químicos da fertilidade do solo.....	30
4.5.2. Teores de macronutrientes no tecido foliar do milho.....	37
4.5.3. Produtividade do milho (2013/14), produtividade e renda acumuladas entre 2009 e 2014.....	39

4.6. Conclusões.....	44
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
ANEXOS.....	54

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Precipitação e temperatura nos meses do ano entre os períodos de 1976-2013 (média histórica) e de novembro de 2011 a abril de 2013 (média no período experimental).....	8
Figura 2. Produtividade de milho (Safrá 2011/12) em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola aplicado em superfície em sistema de plantio direto. ** = significativo com $p < 0,01$; n.s. = não significativo.....	21
Figura 3. Produtividade de trigo (Safrá 2012) em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola aplicado em superfície em sistema de plantio direto. * e ** = significativo com $p < 0,05$ e $0,01$, respectivamente.....	22
Figura 4. Produtividade de soja (Safrá 2012/13) em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola aplicados em superfície em sistema de plantio direto. n.s. = não significativo.....	23
Figura 5. Precipitação e temperatura nos meses do ano entre os períodos de 1976-2013 (média histórica) e de maio de 2013 a março de 2014 (média no período experimental).....	29
Figura 6. Produtividade de milho (Safrá 2013/14) em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola em plantio direto. * = significativo com $p < 0,05$; n.s. = não significativo.....	40
Figura 7. Produtividade acumulada de grãos no período entre 2009 e 2014 em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola em plantio direto. * e ** = significativo com $p < 0,05$ e $0,01$, respectivamente.....	41
Figura 8. Renda acumulada no período entre 2009 e 2014 em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola em plantio direto. * e ** = significativo com $p < 0,05$ e $0,01$, respectivamente.....	42

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1. Caracterização química e teor de argila no perfil de Latossolo Bruno em outubro de 2009, antes do início do experimento (Guarapuava, 2009). (MICHALOVICZ, 2012).....	9
Tabela 2. Resumo das análises de variância, de regressão e médias de pH, acidez trocável (Al^{3+}) e acidez potencial (H+Al) do solo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava 2015).....	11
Tabela 3. Resumo das análises de variância, de regressão e médias de Ca^{2+} , Mg^{2+} e relação Ca/Mg do solo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).....	14
Tabela 4. Resumo das análises de variância, de regressão e médias de K^+ , $S-SO_4^{2-}$ e P do solo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).....	16
Tabela 5. Resumo das análises de variância, de regressão e médias de N, P, K, Ca, Mg e S em folhas de milho sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).....	18
Tabela 6. Resumo das análises de variância, de regressão e médias de N, P, K, Ca, Mg e S em folhas de trigo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).....	19
Tabela 7. Resumo das análises de variância, de regressão e médias de N, P, K, Ca, Mg e S em folhas de soja sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).....	20
Tabela 8. Resumo das análises de variância, de regressão e médias de pH, acidez trocável (Al^{3+}), acidez potencial (H + Al), K^+ e P no solo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).....	31
Tabela 9. Resumo das análises de variância, de regressão e médias de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).....	34
Tabela 10. Resumo das análises de variância, de regressão e médias da relação Ca/Mg e teor de $S-SO_4^{2-}$ no solo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).....	36
Tabela 11. Resumo das análises de variância, de regressão e médias de N, P, K, Ca, Mg e S em folhas de milho sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).....	38

Tabela 12. Renda acumulada do sistema de produção no período entre 2009 e 2014, em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola em plantio direto (Guarapuava-PR, 2015).....	43
--	----

RESUMO

Marcelo Vicensi. Fertilidade do solo, nutrição de plantas, produção de grãos e renda acumulada em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola em plantio direto.

O gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) contém nutrientes essenciais às plantas e, após sua reação, diminui a atividade do alumínio (Al^{3+}) no solo superficial e de subsuperfície, favorecendo a fertilidade e o crescimento das raízes, com benefícios à absorção de água e nutrientes e à produção das culturas. Neste trabalho, avaliaram-se os efeitos de doses e parcelamentos do gesso na fertilidade de um Latossolo Bruno de Guarapuava, Paraná, na nutrição e produtividade das culturas na sucessão milho-trigo-soja-milho, bem como na produção e na rentabilidade acumuladas após oito cultivos sob sistema plantio direto (PD). Trata-se de um estudo de longa duração, cujos tratamentos constituem um fatorial $(4 \times 3) + 1$, sendo quatro doses de gesso (3, 6, 9 e 12 Mg ha^{-1}) e três níveis de parcelamento (P1 = sem parcelamento, 100% da dose em 2009; P2 = parcelamento em dois anos, 50+50% da dose em 2009 e 2010; P3 = parcelamento em três anos, 33+33+33% em 2009, 2010 e 2011), com um tratamento adicional sem aplicação de gesso (controle). O solo foi amostrado em 2012 e 2013, aos 06 e 18 meses após a última aplicação de gesso, em camadas estratificadas até 80 cm. O milho foi semeado em novembro de 2011, o trigo em julho de 2012, a soja em dezembro de 2012 e novamente o milho em outubro de 2013, sendo todos esses cultivos submetidos à amostragem de folhas para análise química. No solo, o uso de gesso aumentou os teores de cálcio (Ca^{2+}) em todas as camadas (2012 e 2013) e o pH nas camadas de 20-40 (2012), 40-60 (2012 e 2013) e 60-80 cm (2012 e 2013), e reduziu os teores de Al^{3+} em todas as camadas (2012 e 2013) e os de magnésio (Mg^{2+}) até 60 cm (2012 e 2013), sem efeito de parcelamento em nenhum dos casos. Já a relação Ca/Mg aumentou linearmente com as doses até 80cm em 2012 e até 60 cm em 2013, com efeito de parcelamento na camada de 0-10 cm: P1 foi inferior a P2 e P3 e estes similares entre si em 2012, e P1 foi inferior a P3 em 2013. O teor de enxofre (S-SO_4^{2-}) aumentou linearmente com as doses em todas as camadas nos dois anos, com efeito de parcelamento até 60 cm, sendo o S-SO_4^{2-} maior com as doses parceladas. Os teores de potássio (K^+), fósforo (P) e acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) não foram alterados pelos tratamentos. Nas folhas, o efeito das doses de gesso foi linear, aumentando os teores de Ca e S e diminuindo os de Mg, em todas as culturas e sem efeito de parcelamento. Em produtividade, o milho respondeu de forma quadrática às doses nas safras de 2011/2012 e 2013/2014, com

máxima eficiência técnica (MET) em 6,38 e 6,34 Mg ha⁻¹ de gesso, respectivamente, diferentemente do trigo (2012) que respondeu com aumento linear em safra sob restrição hídrica, com MET em 12 Mg ha⁻¹ de gesso. Já a produtividade da soja não foi afetada pelas doses de gesso, e nenhuma cultura isoladamente respondeu em produtividade ao parcelamento. Quanto à produtividade acumulada de oito culturas de grãos desde o início do experimento, de 2009 a 2014, houve interação dose x parcelamento, com resposta quadrática às doses em todos os níveis de parcelamento, mas com MET em 5,81, 7,27 e 7,96 Mg ha⁻¹ de gesso em P1, P2 e P3, respectivamente. Em rentabilidade, as doses 3 e 6 Mg ha⁻¹ de gesso foram melhores, sendo mais rentáveis que o controle a partir de um menor de cultivos e também no acumulado ao final do período, em todos os parcelamentos, com vantagem para 6 Mg ha⁻¹ em P1 e P2. A dose de 9 Mg ha⁻¹ gerou renda equivalente à obtida com 3 e 6 Mg ha⁻¹ somente em P3 e no último cultivo. Com 12 Mg ha⁻¹, até o final do período prevaleceram os prejuízos em todos os parcelamentos.

Palavras-Chave: Sulfato, cálcio, condicionador.

ABSTRACT

Marcelo Vicensi. Soil fertility, plant nutrition, grain yield and accumulated income as affected by phosphogypsum rates and split application under no-till.

Phosphogypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) has essential nutrients for plants and, after its reaction, decreases aluminum (Al^{3+}) activity in surface and subsurface soil layers, favoring soil fertility and root growth with benefits for water and nutrient absorption and for crop yield. In this study, the alterations on soil fertility and their resulting effects on the nutrition and yield of the plants on a maize-wheat-soybean-maize succession were evaluated, as well as the accumulated yield and income as affected by phosphogypsum (PG) rates and split application to an Oxisol under no-till system (NT) in Guarapuava, Paraná State. In a long-term field experiment, treatments were arranged in a $(4 \times 3) + 1$ factorial, to study four PG rates (3, 6, 9 and 12 Mg ha^{-1}) under three levels of splitting (P1 = non split, 100% of the rate in 2009); P2 = split in two years, 50 + 50% in 2009 and 2010; P3 = split in three years, 33 + 33 + 33% in 2009, 2010 and 2011), with an additional treatment without PG application (control). The soil was sampled in 2012 and 2013, at 6 and 18 months after the last PG application, in stratified layers up to 80 cm. Maize was sown in November, 2011, and then wheat in July, 2012, soybean in December, 2012 and maize in October, 2013, with sampling of leaves of each crop for chemical analysis. In the soil, the use of PG increased the levels of calcium (Ca^{2+}) in all layers (2012 and 2013) and the soil pH at 20-40 (2012), 40-60 (2012 and 2013) and 60-80 cm (2012 and 2013), and reduced the levels of Al^{3+} in all layers and the levels of magnesium (Mg^{2+}) up to 60 cm (2012 and 2013), without splitting effect in any of these. The Ca/Mg ratio was linearly increased by PG rates up to 80 cm in 2012 and to 60 cm in 2013, with split effect at 0-10 cm layer: P1 was overcome by P2 and P3 and these were similar to each in 2012, and P1 was overcome by P3 in 2013. The sulfur (S-SO_4^{2-}) levels were linearly increased by PG rates in all layers in 2012 and 2013, and split effect occurred up to 60 cm, with higher S-SO_4^{2-} for split rates. The levels of potassium (K^+), phosphorus (P) and potential acidity ($\text{H} + \text{Al}$) were not affected by the treatments. In the leaves, the effects of PG rates were linear, increasing the levels of Ca and S and decreasing the levels of Mg in all crops, without split effect. With regard to crop yield, maize response to PG rates was quadratic in 2011/2012 and 2013/2014 crop seasons, with maximum technical efficiency (MET) at 6.38 and 6.34 Mg ha^{-1} of PG, respectively, unlike wheat (2012) which responded with linear increase in a crop

season under rainfall restriction, with MET at 12 Mg ha⁻¹ of PG. Soybean yield was not affected by PG rates, and no crop alone presented yield response to splitting. For the yield accumulated from eight grain crops since the beginning of the experiment, from 2009 until 2014, there was rate x split interaction with quadratic response to rates in all split levels, but with MET in 5.81, 7.27 and 7.96 Mg ha⁻¹ of PG in P1, P2 and P3, respectively. Also in this period, the financial return was better with 3 and 6 Mg ha⁻¹ of PG, once they gave profits in relation to control from a smaller number of crops and also on the accumulated in the period, in all split levels, but with advantage for 6 Mg ha⁻¹ in P1 and P2. The rate of 9 Mg ha⁻¹ of PG became equivalent to 3 and 6 Mg ha⁻¹ in terms of profit only in P3 for the last crop. With 12 Mg ha⁻¹, in all split levels the economic losses prevailed until the end of the period.

Keywords: Sulfate, calcium, soil conditioner.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é conhecido pela grande produção agrícola, sendo o maior produtor e exportador mundial de café, açúcar, etanol de cana-de-açúcar e suco de laranja, líder mundial em vendas do complexo soja – grãos, farelo e óleo, e terceiro maior produtor de milho, esperando-se significativo aumento na produção deste grão até 2020. Em 2010, cerca de 25% de todos os produtos agrícolas circulando no mundo tinham origem brasileira (MAPA, 2014).

Essa capacidade produtiva se deve ao desenvolvimento da agricultura nacional, com novas cultivares e meios de controle de plantas daninhas, pragas e doenças. Outra parte desse sucesso veio da expansão da área cultivada nas últimas décadas, a qual não seria possível sem calagem e adubação. Por fim, um complemento importante a tudo isso foi a adoção do plantio direto (PD) como sistema de manejo dos solos na década de 70, e sua expansão por todo o país a partir da década de 90, permitindo eliminar custos com preparo de solo, controlar a erosão, reduzir a decomposição de restos culturais e melhorar a sustentabilidade dos agroecossistemas. Até 2012, a segunda maior área de adoção de PD no mundo era do Brasil, com 31,8 milhões de ha (FAO, 2014), dos quais 70% são permanentes, ou seja, após iniciado o PD não se prepara mais o solo (DERPSCH & FRIEDRICH, 2009). No Paraná, por onde o sistema foi introduzido no país, são mais de 3,7 milhões de ha sob PD (IBGE-Sidra, 2014).

Sem o preparo, o PD mantém o solo coberto e reduz perdas de solo e nutrientes com a chuva, acumulando matéria orgânica e melhorando a fertilidade química, física e biológica do solo. Porém, devido à baixa solubilidade e mobilidade vertical do calcário no solo, a ação da calagem sem incorporação em PD se restringe aos primeiros centímetros do perfil geralmente, formando uma camada mais corrigida e fértil em superfície, enquanto as camadas abaixo se tornam mais ácidas, com mais alumínio (Al^{3+}) e menos bases. Com o tempo, cria-se uma barreira química ao crescimento das raízes, que mais superficiais tornam-se mais dependentes da precipitação para absorver água e nutrientes, diminuindo a estabilidade da produção.

Para contornar este problema, vem sendo testado e estudado o gesso agrícola ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) como alternativa. Tido como problema ambiental no início, uma vez que é resíduo das indústrias de fertilizantes fosfatados, passou a ser apreciado no manejo da fertilidade do solo, após a observação de que plantas adubadas com superfosfato simples, que contém gesso, suportaram melhor a estiagem, com menor queda de produção. Mais solúvel que o calcário, o gesso se mobiliza para camadas subsuperficiais do perfil, carreando principalmente Mg^{2+} das

camadas superficiais, mas às vezes também K^+ , e diminuindo a toxidez do Al^{3+} , que se liga aos ânions do gesso (SO_4^{2-} e F^-), o que significa um melhor ambiente para o crescimento radicular, sobretudo em profundidade, e garante maior capacidade de exploração do solo e de absorção de água e nutrientes pelas plantas, especialmente quando há déficit de chuvas.

No entanto, não há consenso sobre os critérios para definir a dose de gesso a se aplicar, talvez devido ao tipo de reação do $CaSO_4$, cujos efeitos atingem profundidades consideráveis no solo, variando em função do tempo e da combinação entre tipo de solo (textura, qualidade física), teor inicial dos elementos (Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e $S-SO_4^{2-}$), espécies cultivadas e precipitação. O que se tem são recomendações com base nas saturações de Al^{3+} e/ou Ca^{2+} na camada de 20-40 cm ou no teor de argila do solo, visando reduzir a toxidez por Al^{3+} , suprir Ca^{2+} e/ou redistribuir no perfil do solo nutrientes como Mg^{2+} e K^+ , normalmente concentrados nas camadas mais superficiais, mas sem promover perdas de nutrientes por lixiviação, uma preocupação comum quanto ao uso do gesso.

Embora possa haver lixiviação de nutrientes com a gessagem, há uma prática muito comum que pode ser utilizada para combatê-la. O parcelamento das doses é uma estratégia bastante utilizada para diminuir as perdas nas adubações com nitrogênio e K^+ , mas que ainda não foi aplicada no Brasil nos estudos com gesso. O parcelamento é, comprovadamente, uma importante forma de viabilizar maior eficiência dos fertilizante (LOPES e GUILHERME, 2000) e, também, menor potencial poluente na aplicação de dejetos (PUJOL, 2012), sobretudo quando as doses aplicadas são elevadas.

Apesar de toda a variação possível de efeitos do uso de gesso sobre o solo e as plantas, dentre as culturas anuais produtoras de grãos as leguminosas, como soja e feijão (CAIRES et al., 2003; 2006; 2011a; FOLONI et al., 2008; NEIS et al., 2010; SORATTO et al., 2010), não têm apresentado respostas de produção à aplicação de gesso, diferentemente de trigo, cevada e milho (TOMA et al., 1999; CAIRES et al., 2001; 2002; 2011a; RAMPIM et al., 2011), cujos rendimentos normalmente aumentam em função da gessagem. Mesmo assim, a dose de gesso que promove máxima eficiência técnica (MET) difere entre as culturas responsivas e pode variar entre cultivares, dependendo das condições climáticas de cada safra.

Considerando que em Guarapuava e região os solos são originalmente ácidos e pobres em bases, em superfície e subsuperfície, mesmo que a fertilidade tenha sido corrigida nas camadas superficiais por meio de calagem e adubação ao longo do tempo, é plausível que o crescimento radicular e, conseqüentemente, o desempenho das lavouras sofram algum grau de

limitação por barreiras químicas relacionadas às características naturais dos solos, sobretudo quando se leva em conta que a maioria das áreas encontram-se sob PD há mais de uma década, excedendo duas décadas em vários casos, sendo possível que o uso do gesso agrícola venha a melhorar a disponibilidade de nutrientes e o ambiente radicular para as plantas, interferindo no desempenho das espécies mais comuns nos sistemas de culturas. As hipóteses são de que (I) haveria respostas distintas à gessagem das culturas de milho, trigo e soja, inclusive quanto à MET, e que (II) o parcelamento das doses de gesso pode significativamente diminuir a mobilização de nutrientes para o subsolo ao longo do tempo, afetando a dose de MET e a rentabilidade do sistema de produção.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de doses de gesso agrícola, submetidas a níveis de parcelamento anual, nos atributos químicos de um Latossolo Bruno, na nutrição e produtividade de milho, trigo e soja em sucessão, bem como na produtividade e renda acumuladas após cinco anos agrícolas, em um sistema de produção sob PD no município de Guarapuava, Paraná.

3. CAPÍTULO I - FERTILIDADE DO SOLO E RESPOSTAS DE MILHO, TRIGO E SOJA EM FUNÇÃO DE DOSES DE GESSO AGRÍCOLA COM E SEM PARCELAMENTO EM PLANTIO DIRETO

3.1 Resumo - Avaliaram-se os efeitos de doses e parcelamentos do gesso na fertilidade de um Latossolo Bruno e nas respostas de milho, trigo e soja sob sistema plantio direto em Guarapuava - Paraná. Os tratamentos foram dispostos em blocos completos ao acaso e arranjo fatorial $(4 \times 3) + 1$, com quatro doses de gesso (3, 6, 9 e 12 Mg ha⁻¹) e três parcelamentos (P1 = 100% em 2009; P2 = 50+50% em 2009 e 2010; P3 = 33+33+33% em 2009, 2010 e 2011), mais um controle sem gesso. O solo foi amostrado seis meses após a última aplicação de gesso (2011), em camadas estratificadas até 80 cm. O milho foi semeado em novembro de 2011, o trigo em julho de 2012 e a soja em dezembro de 2012, coletando-se folhas de cada cultura para análise química. O uso de gesso aumentou os teores de Ca²⁺ em todas as camadas e o pH do solo nas camadas de 20-40, 40-60 e 60-80 cm, e reduziu os teores de Al³⁺ em todas as camadas e os de Mg²⁺ até 60 cm, sem efeito de parcelamento em nenhum caso. A relação Ca/Mg aumentou linearmente até 60 cm com as doses, e foi maior na camada de 0-10 cm com parcelamento em P2 e P3 do que sem parcelamento (P1). Os teores de S-SO₄²⁻ aumentaram linearmente com as doses até 80 cm, decrescendo na ordem P3>P2>P1 até 40 cm e superiores em P3 e P2 em relação a P1 na camada de 40-60 cm, sem diferenças na camada de 60-80 cm. Não houve efeito dos tratamentos sobre os teores de K⁺, P e H+Al. Quanto aos teores foliares, houve aumento de Ca e S e queda de Mg em todas as culturas com o aumento das doses, sem efeito de parcelamento. A produtividade do milho respondeu de forma quadrática às doses, com máxima eficiência técnica estimada em 6,38 Mg ha⁻¹ de gesso, diferente do trigo cuja produtividade aumentou linearmente, em safra com restrição hídrica. A produtividade da soja não foi afetada pelas doses de gesso, e os parcelamentos não afetaram o rendimento em nenhuma cultura. O gesso melhorou a condição geral de fertilidade do solo, sobretudo em profundidade, reduzindo teores de Al³⁺ e aumentando pH, Ca²⁺, S-SO₄²⁻ e relação Ca/Mg, embora reduzindo os teores de Mg²⁺. O parcelamento em dois e três anos manteve maior relação Ca/Mg na camada de 0-10 cm e reduziu a mobilização vertical de S-SO₄²⁻, diminuindo a lixiviação deste nutriente. Em produtividade, a soja não foi afetada pelo gesso, mas milho e trigo mostraram benefícios da gessagem, sobretudo o trigo em safra com falta de chuvas.

Palavras-Chave: Nutrição de plantas, produtividade, relação cálcio/magnésio.

SOIL FERTILITY AND THE PERFORMANCE OF MAIZE, WHEAT AND SOYBEAN UNDER PHOSPHOGYPSUM RATES APLIED WITH AND WITHOUT SPLITTING IN NO-TILL

3.2. Abstract - The effects of rates and splitting of phosphogypsum (PG) on the soil fertility of an Oxisol and the responses of corn, wheat and soybean under no-till were evaluated in Guarapuava, Paraná. Treatments were disposed on randomized blocks in a (4x3) + 1 factorial structure, with four PG rates (3, 6, 9 and 12 Mg ha⁻¹) and three levels of split (P1 = 100% in 2009; P2 = 50+50% in 2009 and 2010; P3 = 33+33+33% in 2009, 2010 and 2011), plus a control without PG. Soil was sampled six months after the last PG application, in stratified layers up to 80 cm depth. Maize was sown in November, 2011, wheat in July, 2012, and soybean in December, 2012, and crops had their leaf tissue sampled for chemical analysis. The use of PG increased the levels of Ca²⁺ in all soil layers and the soil pH in the 20-40, 40-60 and 60-80 cm, and reduced the levels of Al³⁺ in all layers and the levels of Mg²⁺ up to 60 cm depth, without splitting effect in any case. Soil Ca/Mg ratio was increased linearly up to 60 cm depth by the rates, and was higher in 0-10 cm layer by split rates with P2 and P3 then without splitting (P1). The levels of S-SO₄²⁻ was linearly increased by the rates until 80 cm, in decreasing order of splitting P3>P2>P1 up to 40 cm, and with higher values in P3 and P2 in relation to P1 in 40-60 cm layer, without differences in 60-80 cm layer. There was no effect from treatments on K⁺, P and H + Al levels. The leaf levels of Ca and S increased and the levels of Mg decreased in all crops in function of PG rates, without splitting effect. Maize yield responded to PG rates in a quadratic way, with maximum technical efficiency estimated in 6.38 Mg ha⁻¹ of PG, differing from wheat crop which showed linear yield response under drought conditions. The yield of soybean was not affected by PG rates, and splitting did not affect the yield of any crop. PG enhanced soil fertility conditions, mainly in subsurface layers, by decreasing the levels of Al³⁺ and increasing the ones of pH, Ca²⁺, S-SO₄²⁻ and Ca/Mg ratio, although reduced the levels of Mg²⁺. Splitting the rates in 2 or 3 years maintained higher Ca/Mg ratio in the 0-10 cm layer and reduced the vertical mobilization of S-SO₄²⁻, decreasing the leaching of this nutrient. On crop yields, soybean was not affected by PG application, while maize and wheat have shown benefits, specially the wheat crop submitted to drought.

Keywords: Plant nutrition, yield, calcium/magnesium rate.

3.3. Introdução

A agricultura brasileira se destaca na produção de grãos e, também, pelos elevados rendimentos, o que se deve ao uso de tecnologias que visam maximizar o potencial do sistema produtivo. Um exemplo desse sucesso tecnológico é o plantio direto (PD), que desde sua introdução na década de 70 (DERPSCH & FRIEDRICH, 2009) provou ser mais que um conjunto de práticas que garantem o mínimo revolvimento do solo, a manutenção de cobertura morta e o controle da erosão. As áreas em PD apresentam melhoria da qualidade do solo como um todo, permitindo produzir mais e com maior eficiência no uso dos recursos (água, fertilizantes, combustível). Estes fatos impulsionaram a expansão do sistema por todo o território brasileiro, sendo adotado atualmente em quase 32 milhões de ha (FAO, 2014).

Segundo Klein (2011), o solo deve reservar água e nutrientes e fornecê-los junto com ar, pelo maior tempo possível, às raízes das plantas. Por outro lado, para que as raízes se desenvolvam e absorvam água e nutrientes a contento, não pode haver limitações químicas, físicas ou biológicas no solo, as quais geram estresse nutricional e hídrico nas plantas. Como a precocidade tem sido cada vez maior nas culturas produtoras de grãos, períodos curtos de estresse hídrico em fases críticas do desenvolvimento destas plantas têm afetado intensamente a produção. Portanto, gerar condições adequadas de enraizamento das culturas garante não somente o potencial de absorção de água e nutrientes em condições normais, mas também assegura uma maior estabilidade da produção em situações climáticas desfavoráveis.

Entretanto, o uso do “plantio direto” em detrimento ao “sistema plantio direto” após cerca de 40 anos do início dessa verdadeira revolução na agricultura nacional, com o abandono de preceitos amplos de agricultura conservacionista, gerou a estratificação de atributos químicos na camada superficial do perfil e compactação do solo em subsuperfície, o que pode estar contribuindo para as frustrações de safras observadas nos últimos anos (DENARDIN et al., 2008; NUNES et al., 2014).

Quanto à fertilidade do solo, como não há revolvimento em PD, a adição de fertilizantes e corretivos e o acúmulo de resíduos a partir da superfície tendem a agravar a estratificação com o passar do tempo, acumulando carbono e nitrogênio orgânicos (EBELING et al., 2008; VENZKE FILHO et al., 2008), além de fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) nos primeiros 5 a 10 cm do solo (KLEIN, 2007; SPERA et al., 2011; ACQUA et al., 2013; KRAMER et al., 2014). Como já foi demonstrado, o calcário pode ter

mobilidade vertical reduzida nos solos sob PD (RAIJ et al., 1998, ERNANI et al., 2001), e assim, além de menores teores de nutrientes, em subsuperfície o solo é mais ácido e tem maiores teores de alumínio (Al^{3+}), limitando quimicamente o enraizamento.

As soluções de longo prazo para amenizar o gradiente vertical de fertilidade em PD incluem diversificar as espécies, reduzir o tempo entre colheita e semeadura e adicionar ao solo resíduos em quantidade, variedade e frequência compatíveis com a dinâmica biológica do solo (NUNES et al., 2014). Isoladamente, a aplicação de gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) em superfície tem melhorado rapidamente as condições de fertilidade do solo e o ambiente radicular, sobretudo em profundidade (CARVALHO & RAIJ, 1997; TANG et al., 2003).

Devido a características como a solubilidade, o gesso se movimenta no perfil adicionando Ca^{2+} e enxofre (S-SO_4^{2-}) (CAIRES et al., 2006; 2011a; SORATTO & CRUSCIOL, 2008), deslocando Mg^{2+} e às vezes K^+ das camadas superficiais do solo e, juntamente com a água, carreando-os em profundidade (CAIRES et al., 2011b). Além de fornecer e carrear nutrientes, o gesso reduz a atividade do Al^{3+} trocável (TOMA et al., 1999) e a toxidez às raízes, formando pares iônicos como o AlSO_4^- (ZAMBROSI et al., 2007).

Nas plantas, o uso de gesso tem resultado em efeitos positivos no rendimento de grãos de espécies poáceas, com aumentos de produtividade observados em culturas como o milho (RAIJ et al., 1998; CAIRES et al., 1999; 2004; 2011a; TOMA et al., 1999) e o trigo (NIAZI et al., 2000; CAIRES et al., 2002; RASHID et al., 2008). Para fabáceas como a soja, não se tem observado respostas significativas de produtividade ao uso gesso agrícola (NOGUEIRA & MELO, 2003; CAIRES et al., 2003; 2006; 2011a; NEIS et al., 2010).

Embora já se tenha muitos de pesquisa com uso de gesso, ainda não há critérios bem estabelecidos para cálculo de doses, as quais variam com a região, clima, solo e culturas, ainda há pouca informação específica para sistemas de produção com rotação de culturas e nenhuma informação sobre parcelamento de doses de gesso. Este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos de doses e parcelamentos de gesso agrícola nos atributos químicos do solo, na nutrição e na produtividade de milho, trigo e soja sob PD, em Guarapuava, Paraná.

3.4. Material e Métodos

Este estudo foi desenvolvido a partir de um experimento de longa duração, implantado em 2009 no Campo Experimental da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO),

situado no *Campus* CEDETEG, município de Guarapuava – Paraná, e os resultados deste trabalho referem-se ao período de novembro de 2011 a abril de 2013. O clima, de acordo com o sistema Köppen-Geiger, é do tipo Cfb, com verões amenos, sem estação seca definida e com geadas severas. Dados de pluviosidade e temperatura durante a condução do estudo foram obtidos da estação meteorológica do Instituto Agrônomo do Paraná, localizada à cerca de 200 m do experimento, a 25° 23' S, 51° 30' O e 1.026 m altitude (Figura 1).

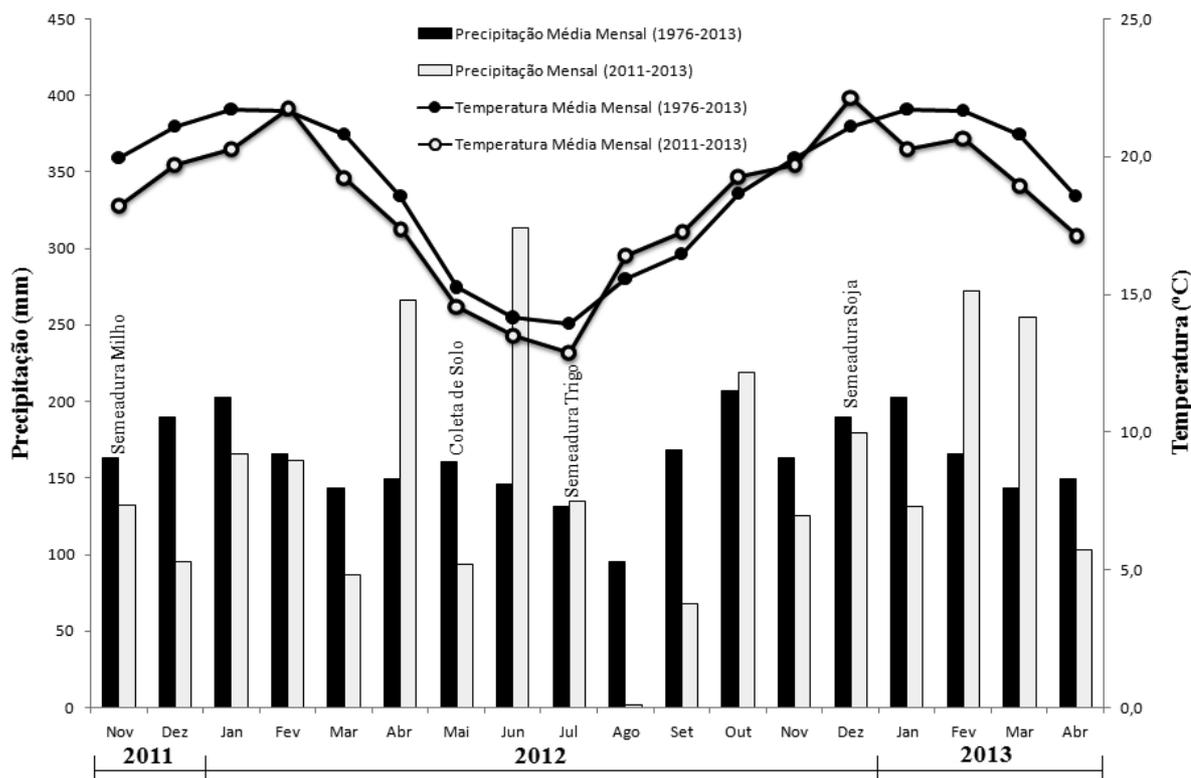


Figura 1: Precipitação e temperatura nos meses do ano entre os períodos de 1976-2013 (média histórica) e de novembro de 2011 a abril de 2013 (média no período experimental).

Em outubro de 2009 fez-se o estudo morfológico, a determinação do teor de argila (EMBRAPA, 1997) e a caracterização química (PAVAN et al., 1992) do solo no perfil (Tabela 1), classificado como Latossolo Bruno distrófico (EMBRAPA, 2013). Mais detalhes sobre a fase inicial do experimento podem ser obtidos em Michalovicz (2012).

O delineamento utilizado foi de blocos ao acaso (DBC), com quatro repetições e unidade experimental de 16 x 6,4 m, com tratamentos arranjados em fatorial (4 x 3) + 1. O primeiro fator foi composto de quatro doses de gesso: 3, 6, 9 e 12 Mg ha⁻¹ (peso seco), representando, respectivamente, 33, 66, 100 e 133% da dose necessária para elevar a saturação inicial de Ca na capacidade de troca de cátions (CTC_{pH7}) a 60% no horizonte A,

sendo que o gesso continha 170 g kg⁻¹ de Ca e 140 g kg⁻¹ de S. O segundo fator foi constituído de três níveis de parcelamento: P1 = sem parcelamento (100% da dose em novembro de 2009); P2 = parcelamento em dois anos (50 + 50% da dose em novembro de 2009 e 2010); e P3 = parcelamento em três anos (33 + 33 + 33% da dose em novembro de 2009, 2010 e 2011). Foi utilizado um tratamento adicional sem aplicação de gesso (controle).

Tabela 1. Caracterização química e teor de argila no perfil de Latossolo Bruno em outubro de 2009, antes do início do experimento (Guarapuava, 2009). (MICHALOVICZ, 2012).

Horiz. ⁽¹⁾	Prof. ⁽²⁾	C	P ⁽³⁾	S-SO ₄ ²⁻	pH	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	V	Argila
	cm	g dm ⁻³	--mg dm ⁻³ --	CaCl ₂		-----cmol _c dm ⁻³ -----					%	g kg ⁻¹
A	0-30	21	1,1	4,7	5,4	0,20	4,96	5,01	2,66	0,26	61	720
AB	30-50	21	0,3	10,5	4,5	0,40	7,66	1,10	1,07	0,08	22	780
BA	50-80	11	0,5	13,3	4,7	0,40	6,18	0,85	1,14	0,04	25	810
Bw1	80-110	10	0,3	4,4	4,7	0,00	5,74	0,65	0,76	0,04	20	830
Bw2	110-140+	6	0,2	3,8	5,3	0,00	3,68	0,29	0,22	0,04	13	820

¹Horizonte pedológico; ²Profundidade; ³P extraído por Mehlich I e S-SO₄²⁻ extraído por CaHPO₃ 0,01 mol l⁻¹.

Em novembro de 2011, completou-se o fatorial aplicando o gesso referente a 33% de cada dose nas parcelas com P3, na implantação do milho (2011-12), que foi seguido de trigo (2012) e soja (2012-13). O milho (P3646H[®]) foi semeado em 15 novembro de 2011, com 62.500 plantas ha⁻¹ e 0,8 m entre linhas, adubação na linha de semeadura com 300 kg ha⁻¹ de formulado NPK 14-33-00, e duas adubações de cobertura: em V4 com 45 kg ha⁻¹ de N (uréia) e 54 kg ha⁻¹ de K₂O (KCl); e em V6 com 58 kg ha⁻¹ de N (uréia). O trigo (OR Mirante[®]) foi semeado em 20 julho de 2012, com 330 sementes m⁻² e 0,2 m entre linhas, adubação na linha de semeadura com 370 kg ha⁻¹ de 05-20-20 e 40 kg ha⁻¹ de N (uréia) em cobertura. A soja (Nidera 5909[®]) foi semeada em 15 dezembro de 2012, com 325.000 plantas ha⁻¹ e 0,4 m entre linhas, adubada com 250 kg ha⁻¹ de 02-20-18 e inoculada com *Bradyrhizobium* sp.

A amostragem do tecido foliar das culturas foi realizada quando ao menos 50% das plantas apresentavam estruturas reprodutivas visíveis, sendo no estágio R1 para o milho, R1 para a soja e 10.5 da escala Feeks-Large para o trigo. Foram tomadas na área central das parcelas, 30 folhas para o milho e soja e 50 folhas para o trigo. A amostragem foi realizada segundo a CQFS (2004), coletando a folha imediatamente abaixo e oposta à espiga para o milho, o terceiro trifólio a partir do ápice da planta da soja e a folha bandeira para o trigo. Logo após a coleta, as folhas foram enxaguadas em água deionizada, e postas para secar em estufa com circulação de ar a 60 °C, em seguida moídas em moinho tipo willey e peneiradas (malha 0,75 mm). O N foi extraído por digestão sulfúrica em bloco digestor, enquanto P, K,

Ca, Mg e S foram extraídos por digestão nítrica em forno micro-ondas. As determinações foram realizadas de acordo com a metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

A amostragem de solo para análise química foi realizada após a colheita do milho, em maio de 2012 (seis meses após a última aplicação de gesso). Doze subamostras por parcela (quatro nas linhas e oito nas entrelinhas) foram coletadas com trado calador, formando amostras compostas das camadas de 0-10 e 10-20 cm, sendo seis subamostras por parcela (duas nas linhas e quatro nas entrelinhas) coletadas com trado holandês para cada amostra composta nas camadas de 20-40, 40-60 e 60-80 cm. As amostras de solo foram secas em estufa com circulação de ar a 65 °C, moídas por moinho de facas e peneiradas em malha 2 mm. As análises seguiram metodologia oficial do Estado do Paraná (PAVAN et al., 1992), com a extração do P por Mehlich-I. O S-SO₄²⁻ foi extraído com fosfato de cálcio 0,01 mol L⁻¹, e determinado por turbidimetria conforme Cantarella & Prochnow (2001).

A produtividade das culturas foi avaliada com colheita manual após a maturidade fisiológica, sendo colhidas em cada parcela quatro subamostras de quatro metros (16 m lineares) no milho e quatro subamostras de três metros (12 m lineares) para soja e trigo. Após debulha manual, os grãos foram pesados e os valores corrigidos para umidade de 130 g kg⁻¹. A dose de máxima eficiência técnica (MET) do gesso foi obtida pela primeira derivada do modelo de regressão para produtividade (análise de regressão), estimando a dose de gesso com a qual seria obtida a produtividade mais elevada.

Os resultados foram submetidos à análise de variância, em DBC com arranjo fatorial (4x3)+1, a 5 e 1% de probabilidade de erro. Havendo interação ($p < 0,05$) entre doses e parcelamentos, procedeu-se à análise de regressão com desdobramento em cada nível de parcelamento. Não havendo interação, o efeito do parcelamento foi comparado pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) e procedeu-se com análise de regressão para as dose de gesso (médias dos parcelamentos), adotando-se os modelos com o maior significância.

3.5. Resultados e Discussão

3.5.1. Atributos químicos da fertilidade do solo

A aplicação do gesso não influenciou o pH do solo nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, independente dos parcelamentos (Tabela 2). Nas camadas de 20-40 e 40-60 cm,

Tabela 2: Resumo das análises de variância, de regressão e médias de pH, acidez trocável (Al³⁺) e acidez potencial (H+Al) do solo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava 2015).

Prof. (cm)	Gesso (Mg ha ⁻¹)	pH (CaCl ₂)			Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)			H + Al (cmol _c dm ⁻³)		
		P1 ¹	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
0-10	0 (controle)	4,48	4,48	4,48	0,27	0,27	0,27	10,62	10,62	10,62
	3	4,57	4,50	4,49	0,19	0,20	0,13	8,82	10,49	9,35
	6	4,53	4,57	4,40	0,18	0,20	0,22	9,34	9,71	8,81
	9	4,51	4,50	4,47	0,20	0,14	0,19	9,97	10,28	9,77
	12	4,47	4,43	4,47	0,15	0,20	0,17	9,42	11,73	10,37
	Parc.² (\bar{X})	4,52^{n.s.}	4,48^{n.s.}	4,46^{n.s.}	0,18^{n.s.}	0,19^{n.s.}	0,18^{n.s.}	9,39^{n.s.}	10,55^{n.s.}	9,82^{n.s.}
	Dose		n.s.			n.s.			n.s.	
Dose x Parc.		n.s.			n.s.			n.s.		
Fat. ³ x controle		n.s.			*			n.s.		
CV (%)		2,19			44,31			18,03		
10-20	0 (controle)	4,51	4,51	4,51	0,25	0,25	0,25	9,86	9,86	9,86
	3	4,65	4,57	4,61	0,10	0,16	0,06	9,16	10,02	8,87
	6	4,57	4,60	4,40	0,15	0,13	0,20	9,77	10,37	10,97
	9	4,62	4,70	4,70	0,14	0,11	0,11	9,35	8,32	9,03
	12	4,72	4,47	4,52	0,13	0,19	0,13	8,74	9,64	10,31
	Parc. (\bar{X})	4,64^{n.s.}	4,59^{n.s.}	4,56^{n.s.}	0,13^{n.s.}	0,15^{n.s.}	0,13^{n.s.}	9,26^{n.s.}	9,59^{n.s.}	9,79^{n.s.}
	Dose		n.s.			n.s.			n.s.	
Dose x Parc.		n.s.			n.s.			n.s.		
Fat. x controle		n.s.			**			n.s.		
CV (%)		3,89			43,25			9,85		
20-40	0 (controle)	4,43	4,43	4,43	0,42	0,42	0,42	11,12	11,12	11,12
	3	4,60	4,57	4,70	0,25	0,26	0,27	10,24	10,46	8,41
	6	4,67	4,70	4,42	0,23	0,21	0,36	10,18	10,49	11,32
	9	4,65	4,67	4,60	0,26	0,18	0,20	10,67	10,07	10,10
	12	4,64	4,48	4,55	0,23	0,30	0,26	9,93	11,28	10,67
	Parc. (\bar{X})	4,64^{n.s.}	4,61^{n.s.}	4,57^{n.s.}	0,24^{n.s.}	0,24^{n.s.}	0,27^{n.s.}	10,25^{n.s.}	10,58^{n.s.}	10,12^{n.s.}
	Dose		n.s.			n.s.			n.s.	
Dose x Parc.		n.s.			n.s.			n.s.		
Fat. x controle		*			*			n.s.		
CV (%)		3,39			49,87			14,51		
40-60	0 (controle)	4,42	4,42	4,42	0,35	0,35	0,35	10,87	10,87	10,87
	3	4,62	4,50	4,62	0,24	0,27	0,25	10,46	10,88	9,89
	6	4,54	4,62	4,50	0,23	0,24	0,23	10,09	10,10	10,74
	9	4,62	4,62	4,60	0,20	0,21	0,20	10,07	9,90	10,14
	12	4,74	4,45	4,57	0,19	0,26	0,26	9,9	10,65	10,26
	Parc. (\bar{X})	4,63^{n.s.}	4,55^{n.s.}	4,57^{n.s.}	0,22^{n.s.}	0,25^{n.s.}	0,24^{n.s.}	10,13^{n.s.}	10,39^{n.s.}	10,27^{n.s.}
	Dose		n.s.			n.s.			n.s.	
Dose x Parc.		n.s.			n.s.			n.s.		
Fat. x controle		*			*			n.s.		
CV (%)		2,62			38,29			6,90		
60-80	0 (controle)	4,40	4,40	4,40	0,27	0,27	0,27	10,87	10,87	10,87
	3	4,43	4,42	4,54	0,22	0,23	0,20	11,63	10,58	9,95
	6	4,55	4,62	4,45	0,23	0,15	0,26	9,92	10,20	11,03
	9	4,65	4,60	4,60	0,19	0,13	0,18	9,95	9,77	10,38
	12	4,70	4,62	4,57	0,15	0,21	0,20	9,95	10,51	10,54
	Parc. (\bar{X})	4,58^{n.s.}	4,57^{n.s.}	4,54^{n.s.}	0,20^{n.s.}	0,18^{n.s.}	0,21^{n.s.}	10,36^{n.s.}	10,27^{n.s.}	10,48^{n.s.}
	Dose		L ⁴ **/0,94				n.s.		n.s.	
Dose x Parc.		n.s.			n.s.			n.s.		
Fat. x controle		**			*			n.s.		
CV (%)		2,22			31,89			8,07		

¹P1 = sem parcelamento (100% da dose em 2009); P2 = parcelamento em dois anos (50 + 50% da dose em 2009 e 2010); e P3 = parcelamento em três anos (33 + 33 + 33% da dose em 2009, 2010 e 2011); ²Parcelamento; ³Fatorial; ⁴Ajuste linear e valor de R² depois da barra; *p<0,05; **p<0,01; n.s.: não significativo.

independentemente de dose ou parcelamento, houve pequeno efeito positivo da aplicação de gesso em relação à testemunha. Na camada de 60-80 cm houve acréscimo linear no pH em função de gesso, porém sem efeito do parcelamento ou de interação. O gesso é um sal neutro e não apresenta propriedades corretivas de acidez, não sendo esperadas alterações no pH do solo em função de sua utilização. No entanto, em camadas subsuperficiais podem ocorrer aumentos de pequena magnitude no pH em função da gessagem, devido à elevação dos teores do ânion sulfato em profundidade, que em altas concentrações pode deslocar íons OH^- adsorvidos aos óxidos hidratados de ferro e alumínio para a solução do solo, num processo conhecido como auto-calagem (REEVE & SUMNER, 1972; RAIJ, 1992), que pode ser pouco estável e reversível (RAIJ, 2008). Resultados semelhantes foram obtidos em outros estudos com aplicação de doses de gesso agrícola, seja nas camadas de 20-40, 40-60 e 60-80 cm (Caires et al., 1999), ou somente nas camadas de 20-40 e 40-60 cm (Caires et al., 2003).

Outra possível explicação para esses acréscimos de pH no solo como efeito da gessagem, seria uma maior absorção de NO_3^- nas camadas subsuperficiais, uma vez que o NO_3^- é facilmente mobilizado para o subsolo, e um dos efeitos descritos do gesso sobre as plantas é uma maior distribuição das raízes em subsuperfície (TANG et al., 2003). Segundo Bloom et al. (2003), ao absorver NO_3^- as plantas liberam OH^- , o que alcaliniza o solo.

Houve redução nos teores de Al^{3+} em todas as camadas de solo avaliadas em função da aplicação de gesso, porém sem efeito de doses e parcelamentos (Tabela 2). Este resultado do gesso sobre o Al^{3+} tem sido atribuído à formação de estruturas hidroxiladas de alumínio, proporcionada pela troca iônica de OH^- pelo SO_4^{2-} (REEVE & SUMNER, 1972). Pode ocorrer também a formação do par iônico do Al^{3+} com SO_4^{2-} (PAVAN et al., 1984) ou com fluoreto (F^-) (ZAMBROSI et al., 2007). O gesso, em geral contém cerca de 15% de SO_4^{2-} e 0,6-3,2% de F^- , e apesar do SO_4^{2-} possuir grande importância na complexação do Al^{3+} , o F^- é muito mais eficiente (CARVALHO & RAIJ, 1997; ZAMBROSI et al., 2007). Em um Latossolo Vermelho, Rampim et al. (2011) também verificaram queda no teor de Al^{3+} com a adição de gesso, assim como Caires et al. (1999), que observaram este efeito até 80 cm de profundidade.

Os valores de $\text{H} + \text{Al}$ não foram influenciados pelas doses de gesso e pelos parcelamentos em nenhuma camada de solo (Tabela 2), em acordo com resultados de Caires et al. (2004), que também não verificaram diferenças, em solo de condição semelhante. No presente estudo, embora tenha havido alterações de pH e Al^{3+} , estas foram de pequena magnitude, sem intensidade suficiente para interferir nos valores de $\text{H} + \text{Al}$ do solo.

Os teores de Ca^{2+} aumentaram linearmente na amostragem realizada 6 meses após a última adição de gesso em todas as camadas avaliadas (Tabela 3), sem efeito de parcelamento. Por conter Ca^{2+} em sua composição (17%), o gesso é fonte deste nutriente, e o aumento nos teores de Ca^{2+} em todas as camadas comprova a mobilidade do gesso, fornecendo Ca^{2+} em todo o perfil. Caires et al. (1999; 2003; 2011b); Soratto & Crusciol (2008) e Rampim et al. (2011) também observaram aumento nos teores de Ca^{2+} em todas as profundidades avaliadas. Em estudo com colunas de lixiviação, Ramos et al. (2006) observaram aumento nos teores de Ca^{2+} com o gesso em todas as profundidades avaliadas. Portanto, a utilização do gesso em PD é uma ferramenta alternativa e complementar à calagem para se aumentar os teores de Ca^{2+} em profundidade, devido a maior solubilidade e mobilidade vertical do gesso no perfil comparado ao calcário (RAIJ, 1988).

O teor de Mg^{2+} nas camadas de 0-10 e 10-20 cm apresentou redução linear com as doses de gesso, sem influência do parcelamento. Nas camadas de 20-40 e 40-60 cm, embora com redução linear nos teores de Mg^{2+} em função das doses, na média das doses e parcelamentos não houve diferença em relação ao controle. Nestas camadas, o Mg^{2+} advindo das camadas superiores por efeito do gesso podem estar compensando sua saída, principalmente com 3 e 6 Mg ha^{-1} de gesso. Já na camada de 60-80 cm, não há efeito de dose nem de parcelamento do gesso, porém a aplicação de gesso aumentou os teores de Mg^{2+} em relação ao controle, indicando acúmulo deste nutriente (Tabela 3). Ca^{2+} e Mg^{2+} que competem entre si pelos mesmos sítios de adsorção no solo, e a grande quantidade de Ca^{2+} fornecida desloca o Mg^{2+} para a solução, que é transportado em profundidade pelo movimento da água (MEDEIROS et al., 2008), podendo também ocorrer ligações iônicas com o SO_4^{2-} , formando MgSO_4^0 , lixiviado/mobilizado com facilidade (ZAMBROSI et al., 2007). Esta redução nos teores de Mg^{2+} também foi verificada em outros estudos (TOMA et al., 1999; SORATTO & CRUSCIOL, 2008; CAIRES et al., 2011a).

Considerar os teores iniciais de Mg^{2+} do solo para recomendações de doses de gesso deve ser importante para o manejo deste nutriente, em função da elevada influência promovida pelo gesso em sua disponibilidade. Apesar da redistribuição de Mg^{2+} pelo perfil ser importante e benéfica, é necessário manter teores adequados nas camadas superficiais para o adequado desenvolvimento das culturas, utilizando-se de estratégias que visam a manutenção dos teores superficiais de Mg^{2+} , como exemplo a utilização de calcário dolomítico ou termofosfato magnesiano aliado à aplicações de elevadas doses de gesso.

Tabela 3: Resumo das análises de variância, de regressão e médias de Ca²⁺, Mg²⁺ e relação Ca/Mg do solo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).

Prof. (cm)	Gesso (Mg ha ⁻¹)	Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)			Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)			Relação Ca/Mg				
		P1 ¹	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3		
0-10	0 (controle)	4,18	4,18	4,18	1,68	1,68	1,68	2,64	2,64	2,64		
	3	4,70	4,91	5,41	1,48	1,13	1,49	3,40	4,97	3,71		
	6	4,80	5,23	4,82	0,84	0,97	0,60	5,75	6,02	8,27		
	9	5,09	5,48	6,10	0,72	0,59	0,67	7,45	10,01	9,79		
	12	5,73	5,09	6,17	0,73	0,33	0,51	8,42	17,06	14,86		
	Parc.² (X̄)	5,07^{n.s.}	5,18^{n.s.}	5,65^{n.s.}	0,94^{n.s.}	0,76^{n.s.}	0,82^{n.s.}	5,53 B	8,14 A	7,85 A		
	Dose		L ⁴ */0,83				L ^{**} /0,87				L ^{**} /0,98	
Dose x Parc.		n.s.				n.s.				n.s.		
Fat. ³ x controle		*				**				**		
CV (%)		15,17				40,16				36,48		
10-20	0 (controle)	3,85	3,85	3,85	1,62	1,62	1,62	2,80	2,80	2,80		
	3	4,38	4,29	4,68	1,63	1,15	1,90	2,90	4,41	2,74		
	6	4,82	4,67	4,56	0,93	1,20	0,90	5,87	4,14	5,67		
	9	4,77	4,96	4,57	0,64	0,68	1,11	7,09	8,84	4,35		
	12	5,22	5,07	5,55	0,56	0,36	0,55	11,55	16,62	10,19		
	Parc. (X̄)	4,80^{n.s.}	4,75^{n.s.}	4,84^{n.s.}	0,94^{n.s.}	0,85^{n.s.}	1,11^{n.s.}	6,85^{n.s.}	8,55^{n.s.}	5,66^{n.s.}		
	Dose		L*/0,91				L ^{**} /0,96				L ^{**} /0,89	
Dose x Parc.		n.s.				n.s.				n.s.		
Fat. x controle		*				**				*		
CV (%)		16,41				38,74				51,02		
20-40	0 (controle)	2,69	2,69	2,69	1,18	1,18	1,18	2,51	2,51	2,51		
	3	2,83	3,42	3,38	1,28	1,30	1,35	2,78	3,43	2,70		
	6	3,70	3,88	3,40	1,04	1,14	0,93	3,91	3,43	3,66		
	9	3,86	3,68	3,85	0,88	1,06	1,25	4,44	4,15	3,54		
	12	3,92	3,94	4,10	0,91	0,84	0,80	4,62	4,92	5,26		
	Parc. (X̄)	3,58^{n.s.}	3,73^{n.s.}	3,68^{n.s.}	1,03^{n.s.}	1,09^{n.s.}	1,08^{n.s.}	3,93^{n.s.}	3,98^{n.s.}	3,79^{n.s.}		
	Dose		L ^{**} /0,93				L ^{**} /0,85				L ^{**} /0,97	
Dose x Parc.		n.s.				n.s.				n.s.		
Fat. x controle		**				n.s.				*		
CV (%)		17,21				30,99				32,35		
40-60	0 (controle)	2,30	2,30	2,30	1,16	1,16	1,16	2,09	2,09	2,09		
	3	2,55	3,03	2,56	1,33	1,45	1,43	1,94	2,22	1,79		
	6	2,92	2,74	2,77	1,16	1,25	1,15	2,54	2,19	2,40		
	9	2,91	3,00	3,39	1,13	1,23	1,35	2,78	2,46	2,53		
	12	3,05	3,23	3,40	1,05	1,05	1,15	3,08	3,14	3,27		
	Parc. (X̄)	2,86^{n.s.}	3,00^{n.s.}	3,03^{n.s.}	1,03^{n.s.}	1,16^{n.s.}	1,22^{n.s.}	2,58^{n.s.}	2,50^{n.s.}	2,50^{n.s.}		
	Dose		L ^{**} /0,97				L*/0,83				L ^{**} /0,97	
Dose x Parc.		n.s.				n.s.				n.s.		
Fat. x controle		**				n.s.				n.s.		
CV (%)		13,88				36,75				26,35		
60-80	0 (controle)	1,80	1,80	1,80	1,13	1,13	1,13	1,73	1,73	1,73		
	3	2,28	2,29	2,12	1,50	1,51	1,55	1,51	1,59	1,38		
	6	2,55	2,26	2,18	1,28	1,83	1,22	2,00	1,23	1,88		
	9	2,47	2,27	2,23	1,42	1,61	1,71	1,88	1,40	1,32		
	12	2,73	2,79	2,62	1,45	1,42	1,48	1,96	2,12	1,81		
	Parc. (X̄)	2,51^{n.s.}	2,40^{n.s.}	2,29^{n.s.}	1,41^{n.s.}	1,59^{n.s.}	1,49^{n.s.}	1,83^{n.s.}	1,58^{n.s.}	1,60^{n.s.}		
	Dose		L*/0,77				n.s.				L*/0,56	
Dose x Parc.		n.s.				n.s.				n.s.		
Fat. x controle		**				*				n.s.		
CV (%)		18,02				18,15				28,16		

¹P1 = sem parcelamento (100% da dose em 2009); P2 = parcelamento em dois anos (50 + 50% da dose em 2009 e 2010); e P3 = parcelamento em três anos (33 + 33 + 33% da dose em 2009, 2010 e 2011); ²Parcelamento; ³Fatorial; ⁴Ajuste linear e valor de R² depois da barra; *p<0,05; **p<0,01; n.s.: não significativo.

A relação Ca/Mg do solo aumentou linearmente em todas as camadas com as doses de gesso, mas nas camadas de 40-60 e 60-80 cm este aumento não foi significativo em relação ao controle. Houve efeito de parcelamento somente na camada de 0-10 cm, onde a aplicação do gesso em dose única resultou em valores de Ca/Mg menores do que em doses parceladas em dois e três anos. Apesar de não diferirem estatisticamente, como os teores de Ca^{2+} foram um pouco superiores e os de Mg^{2+} um pouco inferiores com o parcelamento em dois e três anos, com menos tempo transcorrido após a gessagem, a somatória dessas variações resultou em diferença estatística para o parcelamento. Caires et al. (2011a) também observaram aumento de Ca/Mg com doses de gesso, atribuindo isto ao aumento de Ca^{2+} e lixiviação de Mg^{2+} .

Quanto ao K^+ do solo, não houve efeito de doses e parcelamentos do gesso (Tabela 4). Apesar do K^+ ser um cátion que compete pelos mesmos sítios de carga do solo com Ca^{2+} e Mg^{2+} , o K^+ adicionado para as culturas foi o suficiente para manter os teores adequados mesmo em superfície, sem movimentação significativa em profundidade. Como os teores de K^+ no solo estão altos, é provável que a ciclagem deste elemento pelas culturas esteja mantendo teores satisfatórios em superfície, reduzindo as perdas (RAIJ et al., 1998). Outros trabalhos também não observaram diferenças nos teores de K^+ , como os de Raij et al. (1998) e Caires et al. (2004), embora alguns trabalhos (CAIRES et al., 1998; 2002) tenham verificado pequena mobilização de K^+ em sistema PD. Segundo Souza & Ritchey (1986), os efeitos do gesso sobre o K^+ do solo variam conforme o tipo de solo e a dose aplicada.

A aplicação de gesso aumentou os teores de S-SO_4^{2-} em relação à testemunha e houve interação entre doses e parcelamentos em todas as camadas (Tabela 4). Nas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, o teor no solo aumentou na ordem $\text{P1} < \text{P2} < \text{P3}$, e houve aumento linear do teor de S-SO_4^{2-} no solo com as doses de gesso, mas de 0-10 cm este aumento ocorreu somente em P2 e P3. Nas demais camadas também houve aumento linear do teor de S-SO_4^{2-} no solo com as doses, em todos os parcelamentos, mas de 40-60 cm a diferença entre parcelamentos foi que P3 superou os demais, sem diferença entre P1 e P2, enquanto que na camada de 60-80 cm não houve diferença entre parcelamentos. Outros autores também observaram maior teor de S-SO_4^{2-} em profundidade em resposta a adição de gesso, até 40-60 cm (CAIRES et al., 2011a) e até 60-80 cm (RAIJ et al., 1998). Destes resultados é possível extrair que quanto mais parcelada a dose, maior o tempo de permanência de S-SO_4^{2-} no solo, sobretudo nas camadas superficiais, indicando que quanto maior o tempo após a aplicação (da parcela) do gesso, maior sua mobilização ao longo do perfil e menor a diferença entre as doses.

Tabela 4: Resumo das análises de variância, de regressão e médias de K⁺, S-SO₄²⁻ e P do solo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).

Prof. (cm)	Gesso (Mg ha ⁻¹)	K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)			S-SO ₄ ²⁻ (mg dm ⁻³)			P (mg dm ⁻³)		
		P1 ¹	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
0-10	0 (controle)	0,56	0,56	0,56	41,52	41,52	41,52	8,24	8,24	8,24
	3	0,47	0,54	0,50	47,95	56,02	90,79	8,37	9,52	9,75
	6	0,52	0,44	0,49	63,11	63,42	108,9	9,28	9,20	10,63
	9	0,51	0,49	0,49	52,08	67,69	105,6	10,06	7,82	10,20
	12	0,46	0,50	0,49	58,69	100,4	113,6	11,82	9,65	9,82
	Parc.² (X̄)	0,49^{n.s.}	0,49^{n.s.}	0,50^{n.s.}	55,46 C	71,89 B	104,7 A	9,88^{n.s.}	9,05^{n.s.}	10,09^{n.s.}
	Dose		n.s.			**			n.s.	
Dose x Parc.		n.s.		n.s.	L ⁴ **/0,82	L**/0,73		n.s.		
Fat. ³ x controle		n.s.			**			n.s.		
CV (%)		14,19			13,98			21,32		
10-20	0 (controle)	0,23	0,23	0,23	51,99	51,99	51,99	2,33	2,33	2,33
	3	0,20	0,22	0,23	60,23	83,04	98,70	1,59	2,70	2,06
	6	0,20	0,17	0,23	73,91	83,27	126,3	2,09	1,60	2,51
	9	0,20	0,18	0,22	88,91	88,51	148,0	2,24	2,04	2,20
	12	0,20	0,19	0,25	81,37	132,0	153,4	2,25	1,81	2,35
	Parc. (X̄)	0,20^{n.s.}	0,19^{n.s.}	0,23^{n.s.}	76,11 C	96,72 B	131,6 A	2,04^{n.s.}	2,04^{n.s.}	2,28^{n.s.}
	Dose		n.s.			**			n.s.	
Dose x Parc.		n.s.		L*/0,69	L**/0,69	L**/0,93		n.s.		
Fat. x controle		n.s.			**			n.s.		
CV (%)		22,59			14,27			26,80		
20-40	0 (controle)	0,16	0,16	0,16	88,24	88,24	88,24	1,00	1,00	1,00
	3	0,16	0,19	0,14	118,1	140,2	145,7	1,00	1,56	1,35
	6	0,20	0,18	0,21	132,9	135,1	164,9	1,85	1,42	1,67
	9	0,16	0,13	0,17	162,9	170,9	193,2	1,69	0,96	1,10
	12	0,14	0,12	0,18	155,7	188,0	232,1	1,14	1,13	1,82
	Parc. (X̄)	0,17^{n.s.}	0,16^{n.s.}	0,17^{n.s.}	142,4 C	158,6 B	184,0 A	1,41^{n.s.}	1,27^{n.s.}	1,49^{n.s.}
	Dose		n.s.			**			n.s.	
Dose x Parc.		n.s.		L**/0,80	L**/0,84	L**/0,98		n.s.		
Fat. x controle		**			**			n.s.		
CV (%)		33,50			9,36			42,41		
40-60	0 (controle)	0,11	0,11	0,11	92,13	92,13	92,13	0,52	0,52	0,52
	3	0,13	0,09	0,09	152,1	160,5	162,6	0,61	0,57	0,65
	6	0,13	0,11	0,11	169,6	173,6	183,5	0,75	0,68	0,67
	9	0,10	0,11	0,13	180,9	204,8	214,7	0,64	0,60	0,66
	12	0,08	0,08	0,10	202,2	195,1	248,1	0,68	0,62	0,78
	Parc. (X̄)	0,11^{n.s.}	0,10^{n.s.}	0,11^{n.s.}	176,2B	183,5B	202,2A	0,67^{n.s.}	0,62^{n.s.}	0,69^{n.s.}
	Dose		n.s.			**			n.s.	
Dose x Parc.		n.s.		L**/0,99	L**/0,75	L**/0,99		n.s.		
Fat. x controle		n.s.			**			n.s.		
CV (%)		38,24			7,52			41,09		
60-80	0 (controle)	0,06	0,06	0,06	82,73	82,73	82,73	0,30	0,30	0,30
	3	0,09	0,08	0,08	162,1	132,2	127,4	0,21	0,43	0,43
	6	0,06	0,06	0,08	180,0	184,9	169,2	0,39	0,39	0,44
	9	0,08	0,07	0,07	195,0	237,0	185,1	0,65	0,25	0,35
	12	0,08	0,06	0,07	216,2	202,0	216,8	0,62	0,26	0,46
	Parc. (X̄)	0,08^{n.s.}	0,07^{n.s.}	0,08^{n.s.}	188,3^{n.s.}	189,0^{n.s.}	174,6^{n.s.}	0,47^{n.s.}	0,33^{n.s.}	0,42^{n.s.}
	Dose		n.s.			**			n.s.	
Dose x Parc.		n.s.		L**/0,99	L**/0,60	L**/0,97		n.s.		
Fat. x controle		n.s.			**			n.s.		
CV (%)		26,83			9,48			57,84		

¹P1 = sem parcelamento (100% da dose em 2009); P2 = parcelamento em dois anos (50 + 50% da dose em 2009 e 2010); e P3 = parcelamento em três anos (33 + 33 + 33% da dose em 2009, 2010 e 2011); ²Parcelamento; ³Fatorial; ⁴Ajuste linear e valor de R² depois da barra; *p<0,05; **p<0,01; n.s.: não significativo.

O $S-SO_4^{2-}$ é um ânion fracamente retido pelo solo, principalmente nas camadas superficiais em PD, pois o acúmulo de matéria orgânica (MO) aumenta as cargas negativas do solo (CASAGRANDE et al., 2003), sendo reduzida a capacidade de retenção de ânions (CTA), e esta ocupada predominantemente pelo fósforo, que é mais fortemente retido e se acumula próximo à superfície por conta das adubações (NPK) constantes das culturas. Em subsuperfície há menor densidade de cargas negativas, devido a menores teores de MO e maior acidez do solo, aumentando a CTA e a retenção do SO_4^{2-} (CAMARGO & RAIJ, 1989), sobretudo nos Latossolos, que possuem maiores teores de óxidos de ferro (EMBRAPA, 1999) e, em condições naturais de acidez, maior CTA. Portanto, maiores teores de $S-SO_4^{2-}$ são encontrados em profundidade (BORGES, 1997; ALVAREZ et al., 2000).

Os teores de P não foram influenciados pelas doses e parcelamentos do gesso (Tabela 4), apesar deste elemento estar contido no gesso em teores residuais (0,2-0,6% P_2O_5), devido à origem do gesso agrícola no processo de fabricação de fertilizantes fosfatados. As características do solo do experimento, Latossolo Bruno muito argiloso, onde o P adicionado tem grande chance de ser adsorvido/fixado pela fração mineral, ainda mais se considerado o fato do gesso ter sido aplicado a lanço em área total, podem ter influenciado neste resultado.

3.5.2. Teores de macronutrientes no tecido foliar das culturas

Os teores foliares de N no milho (Tabela 5), no trigo (Tabela 6) e na soja (Tabela 7) não foram afetados pelos tratamentos. Resultados semelhantes em milho em função da gessagem foram observados por Raij et al. (1998) e Caires et al. (2011a). Apesar da precipitação ter sido cerca de 100 mm inferior à média histórica no mês de dezembro, não houve caracterização de déficit hídrico durante o período de desenvolvimento da cultura (Figura 1), sendo as chuvas regulares, com no máximo 7 dias sem precipitação.

Já o trigo passou por restrição hídrica importante, com apenas 2 mm de precipitação no mês de agosto, seguindo-se com 50 mm a menos do que a média histórica no mês de setembro. Neste caso, a ausência de resultados dos tratamentos sobre os teores foliares de N por ter sido influenciada pela limitação imposta pela seca, que limitou inclusive o potencial produtivo. Caires et al. (2002), também em safra sob restrição hídrica, não obtiveram efeito do gesso sobre os teores foliares de N do trigo. No caso da soja, a maior parte da necessidade de N da cultura provém da fixação biológica, o que diminui potenciais efeitos do gesso sobre

a absorção de N a partir do solo. Nogueira & Melo (2003) e Caires et al. (2003, 2011a) também não observaram efeitos do uso de gesso nos teores foliares de N da soja.

Tabela 5: Resumo das análises de variância, de regressão e médias de N, P, K, Ca, Mg e S em folhas de milho sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
Dose (Mg ha⁻¹)	-----g kg ⁻¹ -----					
0 (controle)	38,56	3,2	19,72	4,53	3,13	3,91
3	37,51	3,25	19,73	4,71	2,94	5,04
6	37,42	3,12	20,08	4,82	2,71	4,87
9	37,90	3,21	19,94	5,09	2,63	5,08
12	37,91	3,25	20,36	5,26	2,39	5,56
Regressão/R²	n.s.	n.s.	n.s.	L ⁴ **/0,98	L ^{**} /0,97	L [*] /0,64
CV(%)	7,73	7,84	4,18	5,86	14,68	12,01
Parcelamento						
P1¹	37,51	3,14	19,88	5,11	2,81	5,22
P2	36,86	3,17	19,83	4,92	2,56	4,94
P3	39,02	3,31	20,39	4,89	2,63	5,25
Efeito	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
CV(%)	7,17	7,56	4,09	7,09	15,97	12,68
Dose x Parc.²	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Fat.³ x controle	n.s.	n.s.	n.s.	**	*	**

¹P1 = sem parcelamento (100% da dose em 2009); P2 = parcelamento em dois anos (50 + 50% da dose em 2009 e 2010); e P3 = parcelamento em três anos (33 + 33 + 33% da dose em 2009, 2010 e 2011); ²Parcelamento; ³Fatorial; ⁴Ajuste linear e valor de R² depois da barra; *p<0,05; **p<0,01; n.s.: não significativo.

Em concordância com os resultados de solo, as culturas avaliadas também não apresentaram absorção diferenciada de P em função das doses e parcelamentos do gesso (Tabelas 5, 6 e 7). Estes resultados corroboram com os encontrados em outros estudos sobre aplicação de gesso em relação ao milho (RAIJ et al., 1998; CAIRES et al., 2004), ao trigo (CAIRES et al., 2002) e à soja (NOGUEIRA & MELO, 2003).

Apesar do incremento nos teores de Ca²⁺ no solo com a gessagem, os teores foliares de K no milho (Tabela 5), no trigo (Tabela 6) e na soja (Tabela 7) não foram influenciados pelos tratamentos, em concordância com os resultados para K⁺ no solo. Portanto, a absorção de K não foi prejudicada por inibição competitiva com Ca. Neste caso, o suprimento de K⁺ para o solo via adubações de implantação em cada cultivo e os teores elevados de K⁺ no solo justificam os resultados. Em outros estudos, o gesso também não influenciou os teores foliares de K no milho (Caires et al., 2011a), no trigo (Caires et al., 2002) e na soja (Caires et al., 2003; 2011a; Nogueira & Melo, 2003).

A diminuição nos teores de Al^{3+} , aliada ao aumento nos teores de Ca^{2+} em todo o perfil, proporciona melhores condições de fertilidade sobretudo no subsolo, estimulando o enraizamento das culturas (CARVALHO & RAIJ, 1997) e aumentando o contato íon-raiz, que no caso do Ca^{2+} tem a interceptação radicular como um importante componente para o desenvolvimento da raiz e para a absorção do nutriente (PRADO, 2008). Portanto, os teores foliares de Ca nas culturas do milho, do trigo e da soja (Tabelas 5, 6 e 7) mostraram-se consonantes com os resultados observados no solo, apresentando aumento linear em função das doses de gesso, sem efeito dos parcelamentos. Estudando milho, Caires et al. (2004, 2011a) também observaram maior teor foliar de Ca com doses de gesso, o mesmo ocorrendo com o trigo (Caires et al., 1999; 2002). Trabalhando com a soja, Quaggio et al. (1993), Caires et al. (2003, 2006) e Rampim et al. (2011) também observaram aumento linear de Ca nas folhas.

Tabela 6: Resumo das análises de variância, de regressão e médias de N, P, K, Ca, Mg e S em folhas de trigo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
Dose (Mg ha⁻¹)	-----g kg ⁻¹ -----					
0 (controle)	42,51	4,26	21,51	2,97	1,58	6,21
3	42,63	4,30	21,33	3,26	1,56	6,57
6	40,25	4,31	21,75	3,31	1,39	6,65
9	42,37	4,38	21,41	3,57	1,44	6,73
12	40,22	4,37	21,19	3,45	1,29	7,10
Regressão/R²	n.s.	n.s.	n.s.	L*/0,60	L**/0,77	L*/0,85
CV(%)	7,01	3,38	4,47	7,11	11,00	7,52
Parcelamento						
P1¹	42,09	4,34	21,18	3,45	1,48	6,71
P2	41,25	4,35	21,72	3,36	1,37	6,69
P3	40,77	4,34	21,35	3,38	1,40	6,89
Efeito	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
CV(%)	7,39	3,45	4,40	7,88	12,47	7,98
Dose x Parc.²	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Fat.³ x controle	n.s.	n.s.	n.s.	**	*	*

¹P1 = sem parcelamento (100% da dose em 2009); P2 = parcelamento em dois anos (50 + 50% da dose em 2009 e 2010); e P3 = parcelamento em três anos (33 + 33 + 33% da dose em 2009, 2010 e 2011); ²Parcelamento; ³Fatorial; ⁴Ajuste linear e valor de R² depois da barra; **p*<0,05; ***p*<0,01; n.s.: não significativo.

A redução dos teores de Mg^{2+} no solo foi acompanhada por redução também na absorção, com queda linear nos teores foliares de milho (Tabela 5), trigo (Tabela 6) e soja (Tabela 7). Elevados teores de Ca^{2+} e K^+ no solo inibem por competição iônica a absorção de Mg^{2+} do solo, podendo causar deficiência nutricional (PRADO, 2008). Entretanto, somente no

caso do trigo sob 6, 9 e 12 Mg ha⁻¹ de gesso os teores ficaram abaixo do nível de suficiência, que é de 1,5 a 4 g kg⁻¹ conforme EMBRAPA (2009).

Raij et al. (1998) e Caires et al. (2004) observaram queda nos teores foliares de Mg²⁺ no milho em função do uso do gesso. No trigo, Caires et al. (2002) não observaram diferenças na concentração foliar de Mg²⁺, porém Rampim et al. (2011) verificaram menores teores foliares com aplicação de gesso. Na cultura da soja, Oliveira & Pavan (1996) e Caires et al. (2003, 2006) observaram queda nos teores foliares de Mg²⁺ com doses de gesso agrícola.

Tabela 7: Resumo das análises de variância, de regressão e médias de N, P, K, Ca, Mg e S em folhas de soja sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
Dose (Mg ha⁻¹)	-----g kg ⁻¹ -----					
0 (controle)	51,90	3,52	21,85	8,47	4,50	3,24
3	52,95	3,48	23,40	9,24	4,46	3,42
6	53,04	3,52	23,42	9,11	4,19	3,67
9	54,62	3,47	22,21	9,57	4,08	3,71
12	55,40	3,57	22,63	9,85	4,05	3,81
Regressão/R²	n.s.	n.s.	n.s.	L*/0,80	L**/0,85	L*/0,89
CV(%)	9,18	9,20	9,12	8,28	6,47	10,05
Parcelamento						
P1¹	54,73	3,53	23,18	9,47	4,28	3,57
P2	53,31	3,51	22,28	9,40	4,16	3,62
P3	53,96	3,49	23,28	9,47	4,15	3,77
Efeito	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
CV(%)	9,24	9,17	9,10	8,81	7,44	10,48
Dose x Parc.²	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Fat.³ x controle	n.s.	n.s.	n.s.	*	**	*

¹P1 = sem parcelamento (100% da dose em 2009); P2 = parcelamento em dois anos (50 + 50% da dose em 2009 e 2010); e P3 = parcelamento em três anos (33 + 33 + 33% da dose em 2009, 2010 e 2011); ²Parcelamento; ³Fatorial; ⁴Ajuste linear e valor de R² depois da barra; *p<0,05; **p<0,01; n.s.: não significativo.

Os teores foliares de S no milho (Tabela 5), no trigo (Tabela 6) e na soja (Tabela 7) foram afetados de forma linear e positiva pelas doses de gesso, mas sem influência dos parcelamentos. Como houve aumento na disponibilidade de S-SO₄²⁻ no solo, as culturas responderam com uma maior absorção. Resultados semelhantes foram observados em outros trabalhos com milho (CAIRES et al., 2011a), trigo (CAIRES et al., 2002) e soja (NOGUEIRA & MELO, 2003; CAIRES et al., 2003; 2011a).

Apesar de ter aumentado estatisticamente a relação Ca/Mg do solo (0-10 cm) e os teores de S-SO₄²⁻ (0 a 60 cm), o parcelamento das doses de gesso não afetou a absorção dos

macronutrientes como um todo, em nenhuma das três culturas estudadas, demonstrando que a magnitude das variações ocorridas no solo não foram suficientes para afetar a absorção das plantas.

3.5.3. Produtividade das culturas

A produtividade do milho não foi influenciada pelo parcelamento, mas respondeu de forma quadrática às doses de gesso (Figura 2), com queda de rendimento nas duas maiores doses, sobretudo na de 12 Mg ha⁻¹ de gesso, reduzindo a média do fatorial e determinando a ausência de efeito na comparação o fatorial e o controle. A dose de máxima eficiência técnica (MET) de aplicação do gesso foi de 6,38 Mg ha⁻¹, com a qual seria obtida uma produção de 10,94 Mg ha⁻¹ de milho, rendimento 5,48% maior do que com o controle.

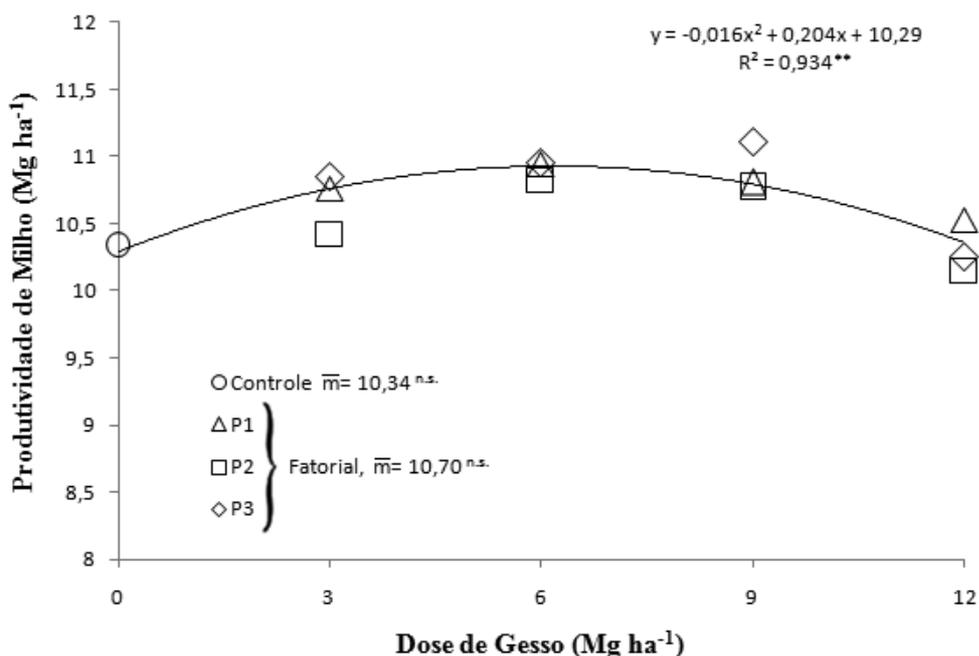


Figura 2: Produtividade de milho (Safrá 2011/12) em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola aplicado em superfície em sistema de plantio direto. ** = significativo com $p < 0,01$; n.s. = não significativo.

Mesmo sendo a dose responsável pela produtividade mais baixa de milho, na média dos parcelamentos o rendimento com 12 Mg ha⁻¹ de gesso ficou apenas 0,30% menor do que no controle. Caires et al. (2011a) obtiveram resultados semelhantes em outro estudo em

Guarapuava, também com efeito quadrático em função das doses de gesso, mas com MET em 7,8 Mg ha⁻¹ de gesso. Os autores concluíram que a redução de produção ocasionada na maior dose avaliada foi devida à lixiviação de Mg²⁺ e K⁺ da camada superficial do solo.

No presente trabalho, os teores foliares de P e K ficaram dentro das respectivas faixas de suficiência e os de N, Ca e S ficaram acima da suficiência para o milho. Já os teores de Mg ficaram abaixo do adequado para a cultura (MALAVOLTA et al, 1997) com a dose de 12 Mg ha⁻¹ de gesso, justificando a queda mais pronunciada de produtividade com esta dose, que apresentou 23% a menos de Mg foliar em relação ao controle.

Diferentemente do milho, a produtividade do trigo aumentou linearmente pela adição de gesso, sem diferenças quanto aos parcelamentos (Figura 3). Houve diferença entre o fatorial e o controle, mostrando que, na média das doses, a aplicação de gesso incrementou a produção de trigo em relação ao controle.

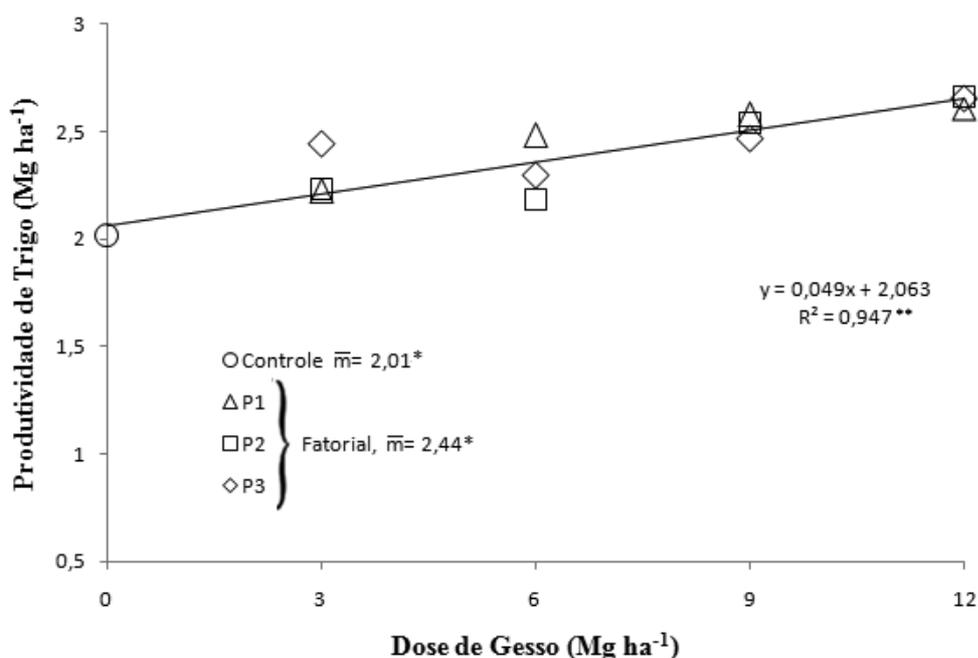


Figura 3: Produtividade de trigo (Safrá 2012) em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola aplicado em superfície em sistema de plantio direto. * e ** = significativo com $p < 0,05$ e $0,01$, respectivamente.

Quanto à soja, a produtividade não respondeu aos tratamentos e não houve diferença entre o fatorial e o controle (Figura 4), em concordância com o fato de que os teores foliares de N, P, K e Mg ficaram dentro das faixas de suficiência, e que os teores de Ca e S ficaram

acima das faixas de suficiência para a cultura (MALAVOLTA et al., 1997). Também não houve restrição hídrica durante o ciclo da cultura (Figura 1), o que poderia potencializar benefícios do gesso às plantas, como observado no caso do trigo.

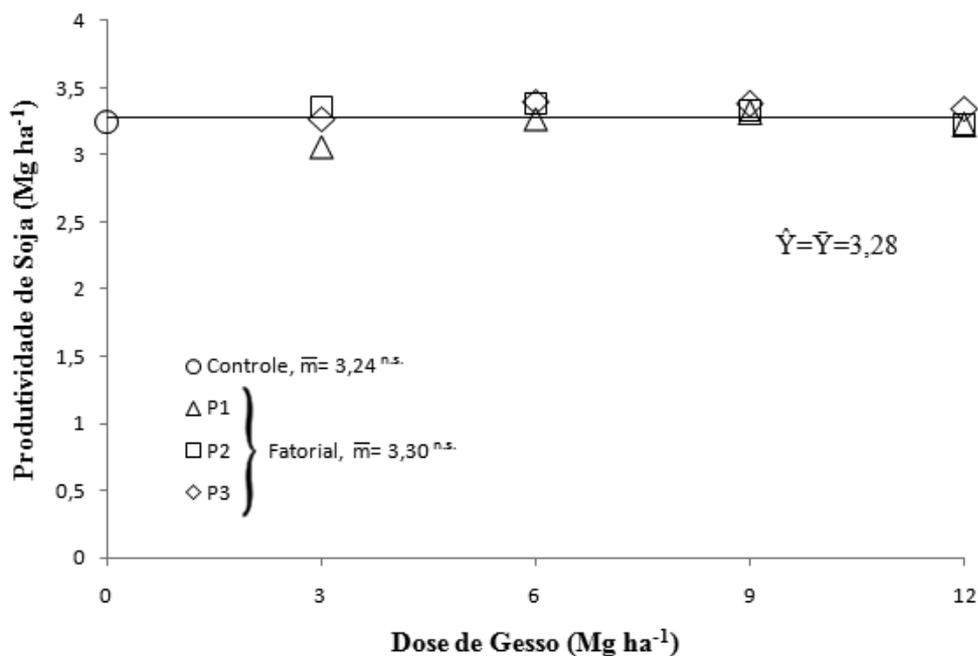


Figura 4: Produtividade de soja (Safrá 2012/13) em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola aplicado em superfície em sistema de plantio direto. n.s. = não significativo.

Caires et al. (2003, 2006, 2011b), Neis et al. (2010) e Rampim et al. (2011) também não obtiveram respostas de produtividade da soja em função da utilização do gesso. Raízes de soja possuem uma capacidade de troca de cátions elevada, em comparação às raízes de milho por exemplo (FERNANDES & SOUZA, 2006), o que gera maior eficiência em acumular íons divalentes como Ca^{2+} e Mg^{2+} na rizosfera, favorecendo a absorção mesmo quando os teores destes nutrientes estão baixos no solo. Ademais, o sistema radicular da soja é pouco influenciado por teores baixos de Al^{3+} no solo em condições de pluviosidade adequada, como ocorrido neste estudo, não influenciando a produtividade da cultura (CAIRES et al., 2001).

3.6. Conclusões

A aplicação de gesso reduziu os teores de Al^{3+} e aumentou os de Ca^{2+} e S-SO_4^{2-} no perfil, mobilizando Mg^{2+} a partir da camada superficial. Parcelar as doses reduziu a lixiviação de S-SO_4^{2-} no perfil, mantendo maiores teores até a camada de 60 cm.

O uso do gesso aumentou os teores foliares de Ca e S e reduziu os de Mg no milho, no trigo e na soja. As respostas de produtividade do milho (quadrática) e do trigo (linear) às doses de gesso contrastaram com a ausência de efeito sobre o rendimento da soja em plantio direto. Não houve resposta das culturas em nutrição e produtividade ao parcelamento das doses.

4. CAPÍTULO II - DOSES E PARCELAMENTOS DE GESSO AGRÍCOLA EM PLANTIO DIRETO: FERTILIDADE DO SOLO, RESPOSTAS DO MILHO, PRODUTIVIDADE E RENDA ACUMULADAS APÓS OITO CULTIVOS

4.1 Resumo - Avaliaram-se os efeitos de doses e parcelamentos do gesso na fertilidade de um Latossolo Bruno sob plantio direto, bem como as respostas do milho na safra 2013/2014 e o comportamento da produtividade e da renda acumuladas entre 2009 e 2014, em Guarapuava - Paraná. Os tratamentos foram dispostos em blocos completos ao acaso, com arranjo fatorial $(4 \times 3) + 1$, sendo quatro doses de gesso (3, 6, 9 e 12 Mg ha⁻¹) e três parcelamentos (P1 = 100% em 2009; P2 = 50+50% em 2009 e 2010; P3 = 33+33+33% em 2009, 2010 e 2011), mais um tratamento sem aplicação de gesso (controle). A amostragem de solo foi feita em maio de 2013, aos 42, 30 e 18 meses após a primeira, segunda e terceira aplicações de gesso, respectivamente, em camadas estratificadas até 80 cm. O milho foi semeado em outubro de 2013, coletando-se folhas para análise química. No solo, o uso de gesso aumentou os teores de Ca²⁺ em todas as camadas e o pH nas camadas de 40-60 e 60-80 cm, e reduziu os teores de Al³⁺ em todas as camadas e os de Mg²⁺ até 60 cm, sem efeito de parcelamento em nenhum caso. A relação Ca/Mg aumentou linearmente até a profundidade de 80 cm com as doses, com efeito de parcelamento somente na camada de 0-10 cm, onde os valores foram superiores em P3 na comparação com P1. Os teores de S-SO₄²⁻ aumentaram linearmente em função das doses em todas as camadas, sendo superiores em P3 na comparação com P2 e P1 até 60 cm de profundidade. Os teores de K⁺, P e H + Al não foram alterados pelos tratamentos. Quanto aos teores foliares, houve aumento linear de Ca e S e queda linear de Mg no milho com as doses, sem efeito de parcelamento. Já a produtividade do milho foi afetada de forma quadrática, com máxima eficiência técnica (MET) estimada em 6,34 Mg ha⁻¹ de gesso. Quanto ao acumulado no período entre 2009 e 2014, a produtividade mostrou interação entre dose e parcelamento, com resposta quadrática às doses nos três níveis de parcelamento, mas com MET em 5,54, 7,38 e 7,96 Mg ha⁻¹ de gesso em P1, P2 e P3, respectivamente. Em termos econômicos, as doses 3 e 6 Mg ha⁻¹ de gesso foram mais rentáveis que o controle a partir de um número menor de cultivos e também no acumulado ao final do período, nos três parcelamentos. Com a dose de 9 Mg ha⁻¹ de gesso, somente no último cultivo e sob parcelamento P3 a renda obtida tornou-se equivalente àquela obtida com 3 e 6 Mg ha⁻¹ de gesso.

Palavras-Chave: Sulfato, retorno econômico, gessagem.

PHOSPHOGYPSUM RATES AND SPLITTING UNDER NO-TILL SYSTEM: SOIL FERTILITY, MAIZE PERFORMANCE, ACCUMULATED YIELD AND INCOME AFTER EIGHT CROPS

4.2. Abstract - The effects of rates and splitting of phosphogypsum (PG) on the soil fertility of an Oxisol under no-till, as well as the responses of maize in the 2013/2014 crop season, and the behavior of cumulative yield and income between 2009 and 2014 were evaluated in Guarapuava, Paraná State. Treatments were disposed on randomized blocks in a (4x3) + 1 factorial structure, with four PG rates (3, 6, 9 and 12 Mg ha⁻¹) and three levels of splitting (P1 = 100% in 2009; P2 = 50+50% in 2009 and 2010; P3 = 33+33+33% in 2009, 2010 and 2011), plus a control without PG application. Soil samples were collected in May, 2013, at 42, 30 and 18 months after the first, second and third PG application, respectively, in stratified layers up to 80 cm depth. Maize was sown in October, 2013, and leaf samples were collected for chemical analysis. In the soil, the use of PG increased Ca²⁺ levels in all layers and pH in the 40-60 and 60-80 cm layers, reduced Al³⁺ levels in all layers and Mg²⁺ up to 60cm, without splitting effects in any case. The Ca/Mg ratio increased linearly with PG rates up to 80 cm depth, with splitting effect only at 0-10 cm, where the values were higher for P3 in relation to P1. The S-SO₄²⁻ levels increased linearly with the rates in all layers, being higher for P3 in relation to P2 and P1 up to 60 cm depth. The levels of K⁺, P and H + Al were not affected by the treatments. With regard to the foliar levels, linear increases of Ca and S and linear decrease of Mg occurred in maize with the rates, without splitting effect. Maize yield, in turn, showed quadratic effect, with maximum technical efficiency (MTE) at 6.34 Mg ha⁻¹ of PG. The cumulative yield between 2009 and 2014 showed rate x split interaction, with quadratic response to PG rates in all three split levels, but with MTE at 5.54, 7.38 and 7.96 Mg ha⁻¹ of PG for P1, P2 and P3, respectively. In terms of economy, the income was better with 3 and 6 Mg ha⁻¹ of PG, once they gave profits in relation to control from a smaller number of crops and also on the accumulated at the end of the period, in all splitting levels. The rate of 9 Mg ha⁻¹ of PG became equivalent to 3 and 6 Mg ha⁻¹ in terms of income only in P3 for the last cultivated crop.

Keywords: Sulfate, economic return, phosphogypsum application.

4.3. Introdução

Iniciado na década de 70 (DERPSCH & FRIEDRICH, 2009), o sistema plantio direto (PD) já é adotado em mais de 30 milhões de ha no Brasil (FAO, 2012), mas conceitos básicos do sistema como manutenção de cobertura morta e rotação de culturas, além do revolvimento mínimo do solo (FAO, 2014), têm sido negligenciados, sendo a monocultura da soja no verão cada vez mais comum, pelo alto valor internacional do grão e cotação do dólar no país. Na safra 2014-2015 no Paraná, a soja ocupou 87% da área destinada a grãos, recuando em 19% a área de milho de primeira safra e 18% a de feijão de segunda safra (SEAB/DERAL, 2014).

A pequena variação de espécies, explorando estratos similares do solo, a aplicação de corretivos e adubos em superfície e o não revolvimento do solo têm prejudicado atributos químicos (COSTA et al., 2009; NUNES et al., 2011) e físicos do solo sob PD (TORMENA et al., 1998; DENARDIN et al., 2008), com destaque para a baixa fertilidade em subsuperfície (RHEINHEIMER et al., 2000), afetando a viabilidade do PD, já que produtividades elevadas e estáveis dependem de adequada fertilidade do solo em superfície e subsuperfície, ainda mais sob restrição hídrica, quando as plantas dependem mais da água armazenada no subsolo.

Para melhorar a fertilidade do solo em PD, pode-se usar o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que, por sua solubilidade, movimenta-se com a água até camadas mais profundas, adicionando Ca^{2+} e SO_4^{2-} (CAIRES et al. 2006; 2011a) no perfil e deslocando Mg^{2+} (e às vezes K^+) do complexo de trocas nas camadas superficiais (CAIRES et al. 2011c), redistribuindo-os em profundidade. O gesso também leva à queda do teor de Al^{3+} (TOMA et al. 1999) e da toxidez às raízes, pela formação de pares iônicos com SO_4^- e F^- presentes no gesso (ZAMBROSI et al. 2007), melhorando as condições de enraizamento e absorção de nutrientes, principalmente em camadas menos superficiais do perfil (CARVALHO & RAIJ, 1997; TANG et al. 2003).

Como resultado, o rendimento das culturas produtoras de grãos tem melhorado com uso de gesso em PD, sobretudo de poáceas como milho (CAIRES et al. 1999; 2004; 2011a), trigo (CAIRES et al., 2002) e cevada (CAIRES et al., 2001). As fabáceas, porém, não têm respondido significativamente ao gesso, tanto a soja (CAIRES et al., 2006; 2011a; NEIS et al., 2010), quanto o feijão (SORATTO et al., 2010). Como os efeitos do gesso duram anos (TOMA et al., 1999), variando em função da textura e *status* inicial da fertilidade do solo (teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , SO_4^{2-}), clima e espécies cultivadas, as doses benéficas de gesso variam conforme o local e o sistema de produção, o que implica na busca regional por

critérios de recomendação, via de regra a partir de estudos de curva dose-resposta das culturas e definição de doses de máxima eficiência técnica (MET).

Se por um lado há muita informação sobre doses e MET, o parcelamento das doses não tem sido estudado, e poucos são os dados sobre rentabilidade da gessagem considerando sistemas de produção com rotação de culturas. Caires et al. (2011c), estudando produtividade e retorno econômico da rotação milho-trigo-soja-soja-milho entre 2004 e 2008, com aplicação (1998) e reaplicação (2004) de gesso, obtiveram resposta linear positiva tanto da produtividade acumulada quanto da receita bruta às doses iniciais de gesso (0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹), com ou sem a reaplicação (6 Mg ha⁻¹), mas sendo maior (em média) a produtividade com a reaplicação. Neste caso, o aumento médio de lucro resultante da reaplicação do gesso foi próximo de US\$ 100 ha⁻¹ no período.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de doses e parcelamentos de gesso agrícola em atributos químicos do solo, na nutrição e produtividade do milho na safra 2013-2014 e na produtividade e renda acumuladas entre 2009 e 2014, em um sistema de rotação de culturas sob PD em Guarapuava, Centro-Sul do Paraná.

4.4. Material e Métodos

Trata-se de um estudo de longo prazo, instalado em 2009 no Campo Experimental da Universidade Estadual do Centro-Oeste, em Guarapuava, Paraná. Os resultados apresentados neste capítulo se referem aos dados de atributos químicos do solo, nutrição e produtividade do milho na safra 2013/2014, coletados entre maio de 2013 e março de 2014, e também aos dados de produtividade acumulada desde o início do experimento (Anexo I), portanto entre novembro de 2009 e março de 2014, com os quais se calculou a rentabilidade no período.

Informações sobre o teor de argila do solo e as condições iniciais de fertilidade antes da implantação do experimento, além do delineamento experimental e detalhes sobre os tratamentos estão descritos no capítulo I, iniciando na página 7. Dados de pluviosidade e temperatura entre maio de 2013 e março de 2014 (Figura 5) foram obtidos na estação meteorológica do Instituto Agrônomo do Paraná, localizada a 25° 23' S, 51° 30' O e 1.026 m altitude, a cerca de 200 m do experimento.

Em maio de 2013, aos 42, 30 e 18 meses, respectivamente, da 1^a, 2^a e 3^a aplicações de gesso (conforme os parcelamentos), coletou-se o solo em cada parcela, sendo 12 subamostras

(trado calador) nas camadas de 0-10 e 10-20 cm e seis subamostras nas camadas de 20-40, 40-60 e 60-80 cm (trado holandês). As amostras compostas de cada parcela e camada foram secas em estufa com circulação de ar a 65 °C, moídas em moinho de facas e peneiradas (malha 2 mm) anteriormente às análises químicas, que seguiram metodologia descrita por Pavan et al. (1992), com P extraído por Mehlich-I. Já o S-SO₄²⁻ foi extraído com fosfato de cálcio e determinado por turbidimetria, conforme Cantarella & Prochnow (2001).

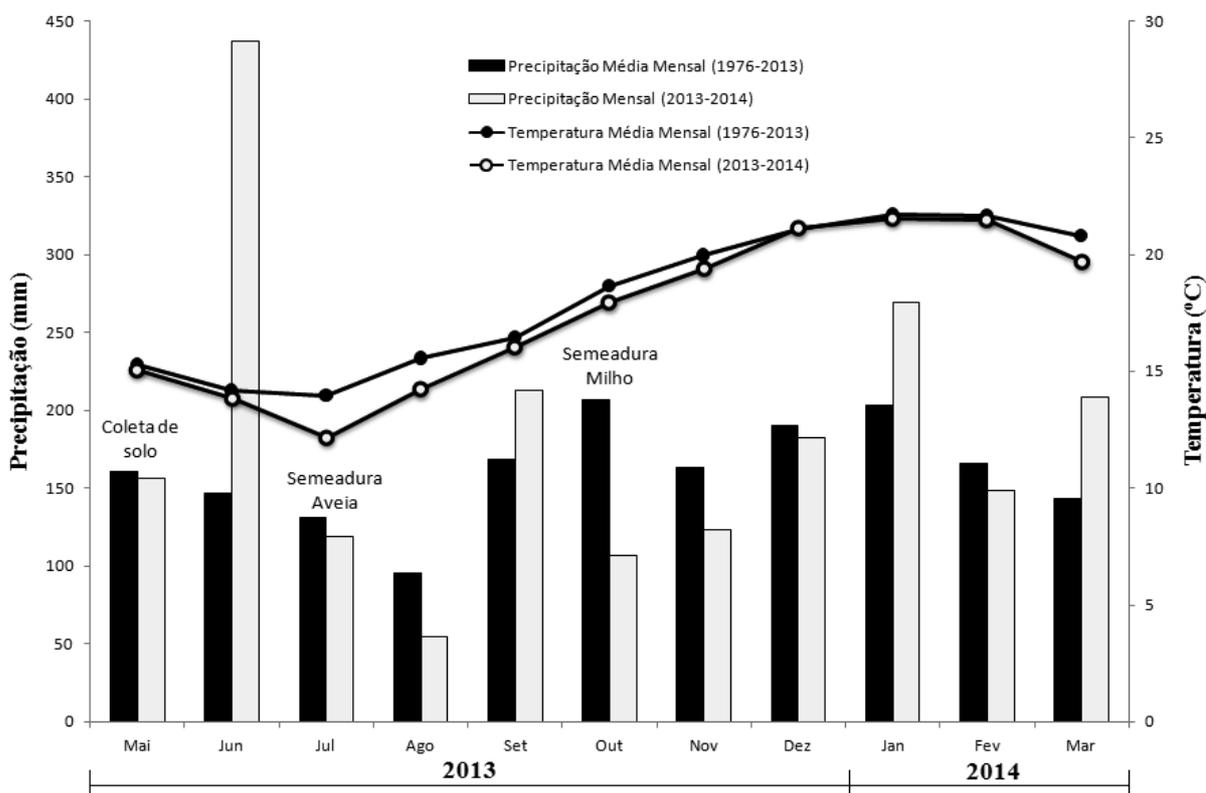


Figura 5: Precipitação e temperatura nos meses do ano entre os períodos de 1976-2013 (média histórica) e de maio de 2013 a março de 2014 (média no período experimental).

Em 15/07/2013, implantou-se a aveia branca (URS Guria) com 80 kg ha⁻¹ de sementes, 17 cm entrelinhas e 50 kg ha⁻¹ de N (ureia), manejada como adubo verde. Em 11/10/2013, implantou-se o milho (RB 9108 VT PRO) com 72.000 sementes ha⁻¹, 80 cm entrelinhas e 360 kg ha⁻¹ de NPK 12-31-17+0,4% Zn. Adubou-se em cobertura com 90 kg ha⁻¹ de N (uréia) no estágio V4, e 90 kg ha⁻¹ de N (uréia) + 60 kg ha⁻¹ de K₂O (KCl) no estágio V6. No estágio R1, no centro das parcelas, coletaram-se 30 folhas imediatamente abaixo e opostas às espigas (CQFS-RS/SC, 2004). O material foi enxaguado em água deionizada, seco em estufa com circulação de ar a 60 °C, moído em moinho tipo willey e peneirado (0,75 mm).

A extração dos nutrientes se deu por digestão sulfúrica (bloco digestor) para N e nítrica (forno micro-ondas) para P, K, Ca, Mg e S, determinadas de acordo com Malavolta et al. (1997).

A produtividade foi avaliada colhendo-se quatro subamostras de quatro metros cada (total de 16 m lineares) no centro das parcelas, e o peso dos grãos foi corrigido para 13 % de umidade. Além desse cultivo, para estudar a rentabilidade resgataram-se as produtividades das culturas anteriores, sendo as de milho (2009/2010), cevada (2010), feijão preto (2010/2011) e trigo (2011) oriundas de Michalovicz (2012), e as de milho (2011/2012), trigo (2012) e soja (2012/2013) do Capítulo I. A produtividade obtida sem gesso foi subtraída da produtividade de cada tratamento, gerando um diferencial de produtividade devido às doses e parcelamentos de gesso em cada cultivo. Com este valor, calculou-se a receita (R\$ ha⁻¹) a partir da cotação média dos grãos entre Janeiro de 2010 e Dezembro de 2014 no Paraná (R\$ Mg⁻¹): milho = 336,0; cevada = 553,0; feijão = 1559,3; trigo = 517,3; soja = 859,8 (AGROLINK, 2015). Levantou-se o custo do gesso entregue na propriedade (R\$ 100,00 Mg⁻¹) e da aplicação (R\$ 11,50 ha⁻¹) em Guarapuava-PR, calculando-se a renda (receita - custo) em relação ao controle.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), com $\alpha = 0,05$. Havendo interação entre dose e parcelamento, procedeu-se à análise de regressão com desdobramento em cada nível de parcelamento. Sem interação, o efeito do parcelamento foi comparado pelo teste de Tukey, e procedeu-se à análise de regressão em função das doses utilizando a média dos níveis de parcelamento em cada dose, adotando-se os modelos com o maior nível de significância. Por haver valores positivos e negativos de renda, os dados foram transformados ($x = x + 1900$) antes da ANOVA.

4.5. Resultados e Discussão

4.5.1 Atributos químicos da fertilidade do solo

Não houve efeito do parcelamento nem do aumento das doses de gesso sobre o pH do solo (Tabela 8); porém, nas camadas de 40-60 e 60-80 cm o pH do solo foi maior na média do fatorial do que no tratamento sem gesso (controle). Condicionador de solo (ALCARDE & RODELLA, 2003), o gesso não possui ação corretiva direta sobre a acidez, mas o pH do solo de subsuperfície pode sofrer pequenos aumentos após a gessagem, em resposta a um processo pouco estável e reversível (RAIJ, 2008) chamado de autocalagem (REEVE & SUMNER,

1972; RAIJ, 1992), resultante do aumento dos teores de S-SO₄²⁻, que em altas concentrações desloca, para a solução do solo, íons OH⁻ adsorvidos aos óxidos hidratados de ferro e alumínio. Caires et al. (2003) observaram aumento do pH na camada de 40-60 cm aos 8, 20 e 32 meses após a gessagem, e na camada de 60-80 cm aos 43 meses (Caires et al., 2004).

Tabela 8: Resumo das análises de variância, de regressão e médias de pH, acidez trocável (Al³⁺), acidez potencial (H + Al), K⁺ e P no solo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).

Prof. (cm)	ANOVA	pH	Al ³⁺			P (mg dm ⁻³)
			----- (cmolc dm ⁻³) -----			
0-10	Dose (D)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Parcelamento (P)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	D x P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	\bar{x} Fatorial (F)	4,53	0,16	9,63	0,42	13,35
	\bar{x} Controle (C)	4,45	0,36	10,65	0,44	12,23
	F x C	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.
	CV (%)	3,69	48,74	13,46	9,97	27,58
10-20	Dose (D)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Parcelamento (P)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	D x P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	\bar{x} Fatorial (F)	4,65	0,14	8,41	0,24	2,80
	\bar{x} Controle (C)	4,57	0,32	9,07	0,26	2,33
	F x C	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.
	CV (%)	3,92	58,21	13,50	18,52	35,19
20-40	Dose (D)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Parcelamento (P)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	D x P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	\bar{x} Fatorial (F)	4,60	0,24	9,21	0,15	1,91
	\bar{x} Controle (C)	4,50	0,48	9,53	0,14	1,54
	F x C	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.
	CV (%)	3,06	40,86	11,19	30,65	28,52
40-60	Dose (D)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Parcelamento (P)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	D x P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	\bar{x} Fatorial (F)	4,61	0,25	9,04	0,08	1,24
	\bar{x} Controle (C)	4,46	0,37	9,44	0,10	1,31
	F x C	*	*	n.s.	n.s.	n.s.
	CV (%)	2,38	36,86	10,45	41,67	29,97
60-80	Dose (D)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Parcelamento (P)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	D x P	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	\bar{x} Fatorial (F)	4,63	0,20	8,36	0,06	1,05
	\bar{x} Controle (C)	4,49	0,30	8,62	0,06	1,07
	F x C	*	**	n.s.	n.s.	n.s.
	CV (%)	2,55	29,88	9,72	44,47	29,73

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; n.s.: não significativo.

Quanto ao Al³⁺, também houve diferença significativa somente entre o controle e o fatorial, mas neste caso o efeito se deu em todas as camadas de solo avaliadas, sendo o teor médio de Al³⁺ no controle inferior em relação ao fatorial (Tabela 8). Além de causar aumento

de pH, a troca de ligantes entre SO_4^{2-} do gesso e OH^- dos óxidos hidratados também pode formar estruturas hidroxiladas de alumínio (REEVE & SUMNER, 1972), reduzindo o teor de Al^{3+} em solução com o uso de gesso, o que pode ainda ocorrer pela complexação do Al^{3+} com S-SO_4^{2-} (PAVAN et al., 1984) e com fluoreto (F^-) (ZAMBROSI et al., 2007), ambos presentes no gesso, aumentando a mobilização do Al^{3+} em profundidade no perfil com a diminuição da carga líquida (PAVAN et al., 1984), o que garante a redução da toxidez do Al^{3+} às raízes das plantas (SOUSA, 1996). Soratto & Crusciol (2008) e Rampim et al. (2011) também observaram queda no teor de Al^{3+} em diferentes camadas de solo após a adição de gesso.

Embora o gesso tenha alterado estatisticamente o pH e os teores de Al^{3+} do solo, como a magnitude dos valores envolvidos foi pequena, em nenhuma camada avaliada tais efeitos foram suficientes para afetar a acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) do solo (Tabela 8), confirmando que o gesso não tem propriedades corretivas de acidez. Este resultado vai ao encontro dos de Caires et al. (2004), que não observaram efeito da gessagem sobre os valores de $\text{H} + \text{Al}$, também em Latossolo com textura argilosa.

No presente trabalho, os teores de K^+ não foram significativamente afetados pela gessagem em nenhuma camada do solo avaliada (Tabela 8). Apesar do Ca^{2+} competir com o K^+ pelos mesmos sítios de adsorção no solo, a adubação potássica de semeadura das culturas, aliada à ciclagem de nutrientes (RAIJ et al., 1998) pela palhada em PD repõem o nutriente nas camadas superficiais do solo, contrapondo a possível mobilização em profundidade resultante do uso do gesso. Outro fato a se considerar para este resultado é que a formação do par iônico K_2SO_4^0 é menor do que a do par iônico MgSO_4^0 (ZAMBROSI et al., 2007), havendo, assim, menor mobilização de K^+ . Caires et al. (2004) e Raij et al. (1998) também não observaram efeitos do gesso sobre o K^+ do solo.

O P, mesmo presente no gesso agrícola como impureza (RAIJ, 2008), em teores que podem chegar a 0,6-0,75 % devido ao fato de ser subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados (VITTI, 2000), não foi afetado pelas doses e parcelamentos do gesso, em nenhuma camada de solo (Tabela 8). Também não houve diferença significativa entre a média do fatorial e a média do controle. Este resultado pode ser explicado pelo fato da área do estudo estar sob PD há anos, portanto sem revolvimento do solo. Como o P é um elemento quase imóvel no solo (SANTOS et al., 2008), um possível efeito do gesso sobre o P do solo se daria nas camadas mais superficiais, que no caso estão sujeitas a efeitos cumulativos das adubações de semeadura concentradas nos sulcos e da reciclagem promovida pelas culturas, tornando-se

fontes quantitativamente mais importantes de adição de P no solo do que o gesso, aplicado a lanço na superfície do solo nos primeiros anos de experimentação.

O uso do gesso promoveu acréscimos nos teores de Ca^{2+} em todas as camadas de solo avaliadas, com diferença significativa entre o controle e a média do fatorial e resposta linear com o incremento das doses, porém sem efeito dos parcelamentos (Tabela 9). Este resultado comprova a eficiência do gesso aplicado na superfície do solo em fornecer Ca^{2+} até camadas mais profundas do perfil, como observado por Chaves et al. (1988) e Rampim et al. (2011). Utilizando lisímetros, Ramos et al. (2006) também comprovaram a movimentação de Ca^{2+} utilizando gesso, sendo esta maior em comparação às demais fontes, pela mobilidade maior do Ca^{2+} no par iônico com sulfato (CaSO_4^0) do que com carbonato (calcário) e com silicato.

Não houve efeito de parcelamento sobre o Mg^{2+} do solo, mas houve efeito das doses de gesso e de forma diferenciada nas diferentes camadas (Tabela 9). Nas de 0-10 e 10-20 cm houve redução linear dos teores Mg^{2+} com as doses, causando diferença significativa entre a média do controle e a média do fatorial, o que se deve ao fato do gesso adicionar ao solo o Ca^{2+} (Tabela 9), que desloca Mg^{2+} para a solução, e também adicionar S-SO_4^{2-} , levando à formação do par iônico MgSO_4^0 , muito móvel no solo (ZAMBROSI et al., 2007). Nas camadas de 20-40 e 40-60 cm, também houve redução linear com as doses, porém sem diferença entre fatorial e controle, indicando recuperação da média do fatorial em relação à do controle e acúmulo do Mg^{2+} mobilizado das camadas acima, sobretudo na dose de 3 Mg ha^{-1} de gesso. Entre 60-80 cm não houve queda dos teores de Mg^{2+} com as doses de gesso, mas voltou a haver diferença entre fatorial e controle, mas nesta camada o teor de Mg^{2+} passou a ser maior no fatorial, comprovando acúmulo de Mg^{2+} mobilizado verticalmente no perfil.

Embora o Mg^{2+} das camadas superiores do solo tenha se acumulado em subsuperfície, houve lixiviação para além dos 80 cm de profundidade. Comparando as doses de 0 e 12 Mg ha^{-1} de gesso, na média dos parcelamentos, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm houve reduções de $85,2 \text{ kg ha}^{-1}$, $85,3 \text{ kg ha}^{-1}$, $105,6 \text{ kg ha}^{-1}$ e $103,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de Mg^{2+} , e um aumento de $48,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de Mg^{2+} na camada de 60-80 cm, totalizando um déficit de $331,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de Mg^{2+} entre 0 e 80 cm. De fato, é frequente a lixiviação de Mg^{2+} do solo em estudos com gesso (RAIJ et al., 1994; TOMA et al., 1999; RAMPIM et al., 2011), devendo-se atentar para o fato de que teores abaixo do nível crítico (NC) podem diminuir a produtividade. Segundo Caires et al. (2011a), pode-se manter teores adequados de Mg^{2+} no solo ao aplicar elevadas doses de gesso, utilizando calcário dolomítico e fertilizantes que contenham Mg^{2+} .

Tabela 9: Resumo das análises de variância, de regressão e médias de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).

Prof. (cm)	Gesso (Mg ha ⁻¹)	Ca^{2+} (cmol _c dm ⁻³)			Mg^{2+} (cmol _c dm ⁻³)		
		P1 ¹	P2	P3	P1	P2	P3
0-10	0 (controle)	3,13	3,13	3,13	1,33	1,33	1,33
	3	3,95	3,96	4,48	1,36	1,13	1,10
	6	4,00	4,66	3,77	0,81	1,04	0,80
	9	4,70	4,69	4,81	0,84	0,87	0,77
	12	4,84	4,59	5,27	0,78	0,49	0,58
	Parc.² (\bar{X})	4,38^{n.s.}	4,48^{n.s.}	4,58^{n.s.}	0,95^{n.s.}	0,88^{n.s.}	0,81^{n.s.}
	Dose		L ⁴ **/0,89				L**/0,94
Dose x Parc.		n.s.				n.s.	
Fat. ³ x controle		**				**	
CV (%)		17,06				24,36	
10-20	0 (controle)	2,92	2,92	2,92	1,25	1,25	1,25
	3	3,83	3,79	3,47	1,61	1,12	1,16
	6	4,34	4,10	3,91	0,78	1,11	0,75
	9	4,55	4,05	4,29	0,72	0,70	0,75
	12	4,87	4,45	4,88	0,68	0,42	0,52
	Parc. (\bar{X})	4,40^{n.s.}	4,10^{n.s.}	4,14^{n.s.}	0,94^{n.s.}	0,84^{n.s.}	0,78^{n.s.}
	Dose		L**/0,98				L**/0,94
Dose x Parc.		n.s.				n.s.	
Fat. x controle		**				**	
CV (%)		15,29				28,80	
20-40	0 (controle)	1,65	1,65	1,65	0,97	0,97	0,97
	3	2,60	2,26	2,70	1,46	1,10	1,22
	6	2,91	2,86	3,09	0,77	0,95	0,82
	9	2,84	3,01	3,05	0,56	0,71	0,84
	12	3,22	3,43	3,72	0,69	0,32	0,58
	Parc. (\bar{X})	2,89^{n.s.}	2,89^{n.s.}	3,14^{n.s.}	0,87^{n.s.}	0,77^{n.s.}	0,87^{n.s.}
	Dose		L**/0,92				L**/0,93
Dose x Parc.		n.s.				n.s.	
Fat. x controle		**				n.s.	
CV (%)		14,89				25,939	
40-60	0 (controle)	1,40	1,40	1,40	1,07	1,07	1,07
	3	2,05	1,79	1,93	1,43	1,25	1,23
	6	2,15	1,97	1,85	0,92	1,19	0,94
	9	2,20	3,29	2,29	0,80	0,92	0,93
	12	2,48	2,58	2,87	0,75	0,44	0,73
	Parc. (\bar{X})	2,22^{n.s.}	2,41^{n.s.}	2,23^{n.s.}	0,97^{n.s.}	0,95^{n.s.}	0,96^{n.s.}
	Dose		L**/0,87				L**/0,98
Dose x Parc.		n.s.				n.s.	
Fat. x controle		*				n.s.	
CV (%)		28,62				19,91	
60-80	0 (controle)	1,00	1,00	1,00	1,12	1,12	1,12
	3	1,26	1,26	1,15	1,51	1,34	1,47
	6	1,62	1,88	1,35	1,19	1,45	1,24
	9	2,50	2,07	1,78	1,27	1,43	1,43
	12	2,74	2,73	2,40	1,38	1,25	1,33
	Parc. (\bar{X})	2,03^{n.s.}	1,99^{n.s.}	1,67^{n.s.}	1,34^{n.s.}	1,37^{n.s.}	1,37^{n.s.}
	Dose		L**/0,99				n.s.
Dose x Parc.		n.s.				n.s.	
Fat. x controle		**				**	
CV (%)		27,35				11,36	

¹P1 = sem parcelamento (100% da dose em 2009); P2 = parcelamento em dois anos (50 + 50% da dose em 2009 e 2010); e P3 = parcelamento em três anos (33 + 33 + 33% da dose em 2009, 2010 e 2011); ²Parcelamento; ³Fatorial; ⁴Ajuste linear e valor de R² depois da barra; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; n.s.: não significativo.

Examinando a relação Ca/Mg do solo, tanto a dose quanto o parcelamento do gesso apresentaram efeito na camada de 0-10 cm, inclusive com interação dose x parcelamento (Tabela 10). Com teores numericamente maiores de Ca^{2+} e menores de Mg^{2+} em relação aos demais parcelamentos, P3 acabou sendo superior a P1 quanto à relação Ca/Mg. Quanto às doses, independentemente do parcelamento na camada de 0-10 cm e na média dos parcelamentos para as demais camadas, houve aumento linear da relação Ca/Mg com as doses de gesso. Nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, a relação Ca/Mg foi maior na média do fatorial em comparação ao controle, enquanto nas camadas de 40-60 e 60-80 cm esse efeito não ocorreu, indicando que os maiores acréscimos nos teores de Ca^{2+} e as quedas mais intensas nos teores de Mg^{2+} ocorreram nas camadas de solo até 40 cm de profundidade.

Caires et al. (2011a) também observaram maior relação Ca/Mg no solo pela aplicação de gesso, devidamente atribuída ao aumento nos teores de Ca^{2+} e mobilização de Mg^{2+} . Os autores enfatizaram que, em solos com elevado teor de Mg^{2+} ou relação Ca/Mg muito baixa, isso beneficia a nutrição das plantas em termos de absorção de Ca^{2+} e K^+ , sendo este último elemento muito pouco mobilizado entre as camadas de solo pelo uso de gesso.

Os teores de S-SO_4^{2-} no solo foram influenciados pelas doses e parcelamentos do gesso, mas não houve interação. O teor médio no solo para o fatorial foi superior em relação ao controle em todas as camadas avaliadas (Tabela 10), em resposta ao fornecimento de S-SO_4^{2-} pelo gesso. Em concordância, em todas as camadas avaliadas houve aumento linear dos teores de S-SO_4^{2-} com o incremento das doses de gesso. Acréscimos no teor de S-SO_4^{2-} no solo em resposta à adição de gesso também foram demonstradas em outros trabalhos, até a camada de 40-60 cm no de Caires et al. (2011a) e até 60-80 cm no de Raji et al. (1998).

O SO_4^{2-} é fornecido pelo gesso, mas é fracamente retido no solo e tende a se mobilizar em profundidade pela ação da água e da gravidade, sobretudo em PD, pelo acúmulo de MO a partir da superfície, que resulta em maior número cargas negativas (CASAGRANDE et al., 2003), repelindo este ânion que é a principal forma de S disponível para absorção no solo. Não por acaso, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm observou-se menor teor de S-SO_4^{2-} em P1 e P2 do que em P3, mostrando que quanto menor o tempo transcorrido após a aplicação da dose de gesso, maior o teor de S no solo. Portanto, o parcelamento atenuou a mobilização vertical do S-SO_4^{2-} , mantendo maiores teores em superfície e subsuperfície.

Entretanto, mesmo com os parcelamentos, a mobilização vertical do S-SO_4^{2-} é importante e fica demonstrada pelo fato de já não haver diferença significativa no teor de S-

TABELA 10: Resumo das análises de variância, de regressão e médias da relação Ca/Mg e teor de S-SO₄²⁻ no solo sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).

Prof. (cm)	Gesso (Mg ha ⁻¹)	Relação Ca/Mg			S-SO ₄ ²⁻ (mg dm ⁻³)		
		P1 ¹	P2	P3	P1	P2	P3
0-10	0 (controle)	2,30	2,30	2,30	21,79	21,79	21,79
	3	2,95	3,57	4,08	21,34	25,15	28,64
	6	4,98	4,64	4,69	29,47	21,60	41,10
	9	5,67	5,49	6,53	25,17	30,03	38,36
	12	6,24	9,51	9,37	32,14	39,19	48,69
	Parc.² (X̄)	4,96 B	5,80 AB	6,17 A	27,03 B	28,99 B	39,20 A
	Dose ³		**			L**/0,90	
Dose x Parc.	L ⁴ ** /0,90	L**/0,86	L**/0,92		n.s.		
Fat. ³ x controle		**			*		
CV (%)			18,26		23,35		
10-20	0 (controle)	2,41	2,41	2,41	25,54	25,54	25,54
	3	2,46	3,62	3,03	24,57	36,77	43,33
	6	5,72	3,82	5,22	45,98	35,20	69,27
	9	7,60	6,32	6,28	38,36	51,17	53,18
	12	7,31	10,75	10,17	38,08	64,53	72,22
	Parc. (X̄)	5,77^{n.s.}	6,13^{n.s.}	6,18^{n.s.}	36,75 B	46,92 B	59,50 A
	Dose		L**/0,99			L**/0,82	
Dose x Parc.		n.s.			n.s.		
Fat. x controle		**			**		
CV (%)			29,14		26,43		
20-40	0 (controle)	1,83	1,83	1,83	54,06	54,06	54,06
	3	1,85	2,12	2,22	50,79	77,65	79,49
	6	3,76	3,16	3,75	101,34	84,10	110,89
	9	5,36	4,80	3,65	92,13	104,68	113,79
	12	5,88	7,45	6,90	97,82	103,78	142,13
	Parc. (X̄)	4,21^{n.s.}	4,39^{n.s.}	4,13^{n.s.}	85,52 B	92,55 B	111,58 A
	Dose		L**/0,98			L**/0,88	
Dose x Parc.		n.s.			n.s.		
Fat. x controle		**			**		
CV (%)			28,70		22,15		
40-60	0 (controle)	1,44	1,44	1,44	67,73	67,73	67,73
	3	1,42	1,44	1,53	87,22	94,55	105,92
	6	2,30	1,69	1,96	126,45	113,03	117,77
	9	3,11	3,80	3,15	118,12	130,11	138,93
	12	3,46	6,80	4,21	130,53	131,86	166,69
	Parc. (X̄)	2,57^{n.s.}	3,43^{n.s.}	2,72^{n.s.}	115,58B	117,39B	132,33A
	Dose		L**/0,96			L**/0,97	
Dose x Parc.		n.s.			n.s.		
Fat. x controle		n.s.			**		
CV (%)			55,08		12,89		
60-80	0 (controle)	0,91	0,91	0,91	56,36	56,36	56,36
	3	0,83	0,95	0,77	98,41	81,96	97,86
	6	1,38	1,30	1,07	136,26	120,79	101,50
	9	1,99	1,49	1,25	131,88	135,04	131,03
	12	1,99	2,24	1,82	153,29	147,08	171,89
	Parc. (X̄)	1,55^{n.s.}	1,50^{n.s.}	1,23^{n.s.}	129,96^{n.s.}	121,21^{n.s.}	125,57^{n.s.}
	Dose		L**/0,99			L**/0,98	
Dose x Parc.		n.s.			n.s.		
Fat. x controle		n.s.			**		
CV (%)			30,05		16,24		

¹P1 = sem parcelamento (100% da dose em 2009); P2 = parcelamento em dois anos (50 + 50% da dose em 2009 e 2010); e P3 = parcelamento em três anos (33 + 33 + 33% da dose em 2009, 2010 e 2011); ²Parcelamento; ³Fatorial; ⁴Ajuste linear e valor de R² depois da barra; **p*<0,05; ***p*<0,01; n.s.: não significativo.

SO_4^{2-} no solo entre P1 e P2, aos 42 meses da primeira aplicação de gesso, e pelo comportamento dos teores de S- SO_4^{2-} no perfil, que aumentaram com a profundidade do solo, indo em média de 32 para 122 mg dm^{-3} (280 %), da camada de 0-10 cm para a de e 40-60 cm. Segundo Borges (1997) e Alvarez et al. (2000), em subsuperfície os teores de MO diminuem e a densidade de cargas negativas também, o que aumenta a adsorção do SO_4^{2-} (CAMARGO & RAIJ, 1989). Estes resultados também dão suporte às discussões sobre os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} em profundidade no perfil de solo com a gessagem, já que a mobilidade de ambos seria justificada pela formação de pares iônicos com o SO_4^{2-} (ZAMBROSI et al., 2007) advindo da dissociação do gesso, além da complexação com ácidos orgânicos da decomposição dos restos culturais (FRANCHINI et al., 2003), já que a área está há 8 anos sob PD ininterrupto.

4.5.2 Teores de macronutrientes no tecido foliar do milho

Os teores foliares de N do milho não foram influenciados pelos tratamentos (Tabela 11), mantendo-se acima do NC que vai de 27,5 a 32,5 g kg^{-1} (MALAVOLTA et al., 1997), em consonância à adubação da cultura, que contou com 43 kg ha^{-1} de N na semeadura e duas coberturas de 90 kg ha^{-1} de N cada, em V4 e V6. Outro fator que pode ter contribuído para este resultado é que a cultura não passou por estresse hídrico (Figura 5) que pudesse afetar o aproveitamento do nutriente vindo da adubação. Raij et al. (1998) e Caires et al. (2011a) também não obtiveram efeitos de doses crescentes de gesso nos teores foliares de N do milho.

Assim como no solo, o teor foliar de P do milho não foi influenciado pelos tratamentos (Tabela 11), permanecendo sempre acima da faixa de suficiência para a cultura que é de 2,5 a 3,5 mg dm^{-3} (MALAVOLTA et al., 1997), condizendo com os altos teores de P no solo na camada de 0-10 cm e com a adubação de semeadura (112 kg ha^{-1} de P_2O_5). Caires et al. (2004) e Raij et al. (1998) obtiveram resultados semelhantes estudando milho e gessagem.

Em concordância com o observado para K^+ no solo, não houve influência das doses e parcelamentos de gesso sobre os teores foliares de K do milho, sem diferenças também entre a média do fatorial e do tratamento controle (Tabela 11). Colabora para este resultado o fato de que os teores de K^+ na camada de 0-10 cm, em todos os tratamentos, estiveram acima do NC para a cultura, que é 0,30 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (OLIVEIRA, 2003), favorecendo a absorção. Caires et al. (2011a) obtiveram resultados semelhantes com o milho sob doses de gesso.

Já o teor foliar de Ca do milho aumentou linearmente em função da dose de gesso e foi maior na média do fatorial do que no controle, porém sem efeito de parcelamento (Tabela 11), corroborando com os resultados para os teores de Ca^{2+} no solo. Por ser fortemente adsorvido pelo solo, o Ca^{2+} é pouco propenso à lixiviação e, no geral, é pouco exportado nos grãos colhidos (PRADO, 2008), permanecendo disponível para as plantas, daí a quantidade adicionada de Ca^{2+} (dose) ser mais importante para os teores no solo e para a absorção do que os parcelamentos. Rajj et al. (1998) e Caires et al. (2004) também obtiveram maior teor foliar de Ca no milho com uso de gesso.

Tabela 11: Resumo das análises de variância, de regressão e médias de N, P, K, Ca, Mg e S em folhas de milho sob doses e parcelamentos de gesso agrícola (Guarapuava-PR, 2015).

Tratamento Dose (Mg ha^{-1})	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg^{-1} -----					
0 (controle)	50,00	4,59	20,16	4,76	3,94	7,82
3	51,25	4,69	20,60	5,12	3,33	8,25
6	51,21	4,72	20,52	5,46	2,78	8,59
9	51,05	4,72	21,57	5,39	2,47	8,80
12	50,83	4,66	21,24	5,50	2,30	8,97
Regressão/R²	n.s. ⁴	n.s.	n.s.	L*/0,68	L**/0,94	L*/0,97
CV(%)	4,90	5,81	5,94	6,61	15,63	11,93
P1¹	51,58	4,80	20,73	5,42	2,89	9,13
P2	51,62	4,66	20,71	5,43	2,58	8,38
P3	51,06	4,63	21,50	5,27	2,70	8,44
Efeito Parc.²	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
CV(%)	4,61	5,38	6,00	7,01	21,24	11,61
Dose x Parc.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Fat.³ x controle	n.s.	n.s.	n.s.	**	**	n.s.

¹P1 = sem parcelamento (100% da dose em 2009); P2 = parcelamento em dois anos (50 + 50% da dose em 2009 e 2010); e P3 = parcelamento em três anos (33 + 33 + 33% da dose em 2009, 2010 e 2011); ²Parcelamento; ³Fatorial; ⁴n.s.: não significativo * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; L = ajuste linear e valor de R^2 depois da barra.

No presente estudo, os efeitos do gesso sobre o Mg^{2+} do solo afetaram os teores foliares do nutriente no milho, uma vez que o Mg diminuiu linearmente nas folhas em função das doses de gesso, não sendo afetados pelo parcelamento. Houve menor absorção do nutriente pelas plantas, em média, no fatorial do que no controle (Tabela 11), resultado que se deve não só ao fato da competição iônica com Ca^{2+} afetar a absorção de Mg^{2+} , o que por si só pode causar deficiência nas plantas (PRADO, 2008), mas também devido à queda dos teores de Mg^{2+} entre 0 e 60 cm com o aumento das doses de gesso. Até essa profundidade no solo, as

doses de 6, 9 e 12 Mg ha⁻¹ resultaram em teores de Mg²⁺ próximos ou, sobretudo com 12 Mg ha⁻¹, inferiores ao NC do nutriente para o milho, que é 1,0 cmol_c dm⁻³. Ademais, a relação Ca/Mg ficou acima do ideal para o milho, que é de 3 a 5/1 (CQFS-RS/SC, 2004), em todos os parcelamentos nas camadas de 0-10 e 10-20 cm com as doses de 9 e 12 Mg ha⁻¹ de gesso, chegando a 20-40 cm com 12 Mg ha⁻¹ de gesso. Rajj et al. (1998) e Caires et al. (2004) também obtiveram queda no teor foliar de Mg do milho com doses crescentes de gesso.

A resposta do milho em termos de S foliar foi linear positiva ao aumento da dose de gesso (Tabela 11), semelhante ao observado por Caires et al. (2011a) com a mesma cultura. Entretanto, não houve efeito de parcelamento, apesar do efeito no solo ter sido significativo, demonstrando que o aumento das doses de gesso foi mais importante que a redução da lixiviação do nutriente pelo parcelamento.

4.5.3 Produtividade do milho (2013/14), produtividade e renda acumuladas entre 2009 e 2014

Mesmo sem influenciar o status nutricional de N, P e K (tabela 11), as doses de gesso afetaram a produtividade do milho de forma quadrática (Figura 6), mostrando os benefícios do fornecimento de Ca e S nas doses iniciais e o prejuízo das maiores doses de gesso sobre a absorção de Mg. Os acréscimos de produtividade nas menores doses de gesso foram compensados pelos decréscimos nas doses mais elevadas, o que justifica a ausência de diferença entre o fatorial e o controle.

A máxima eficiência técnica (MET) foi estimada em 6,34 Mg ha⁻¹ de gesso, com a qual a produtividade seria 10,44 Mg ha⁻¹, 7,37% superior em relação ao controle. Os parcelamentos não afetaram a produtividade, o que se justifica pois também não afetaram o status nutricional do milho para nenhum elemento avaliado. Com base nos dados da tabela 9, a queda de produção com 9 e 12 Mg ha⁻¹ de gesso pode ter sido devida a um desbalanço entre Ca e Mg, pois nesses tratamentos os teores foliares de Ca²⁺ foram superiores e os de Mg²⁺ inferiores às demais doses, e o níveis de Mg²⁺ no solo nessas doses ficaram abaixo do NC, afetando a produtividade. Em Guarapuava, Caires et al. (2011a) obtiveram resultado semelhante, com efeito quadrático das doses de gesso na produtividade do milho e MET em 7,8 Mg ha⁻¹ de gesso. Os autores concluíram que a queda de produção na maior dose avaliada (12 Mg ha⁻¹) foi devida à mobilização de Mg²⁺ e K⁺ a partir da camada superficial do solo.

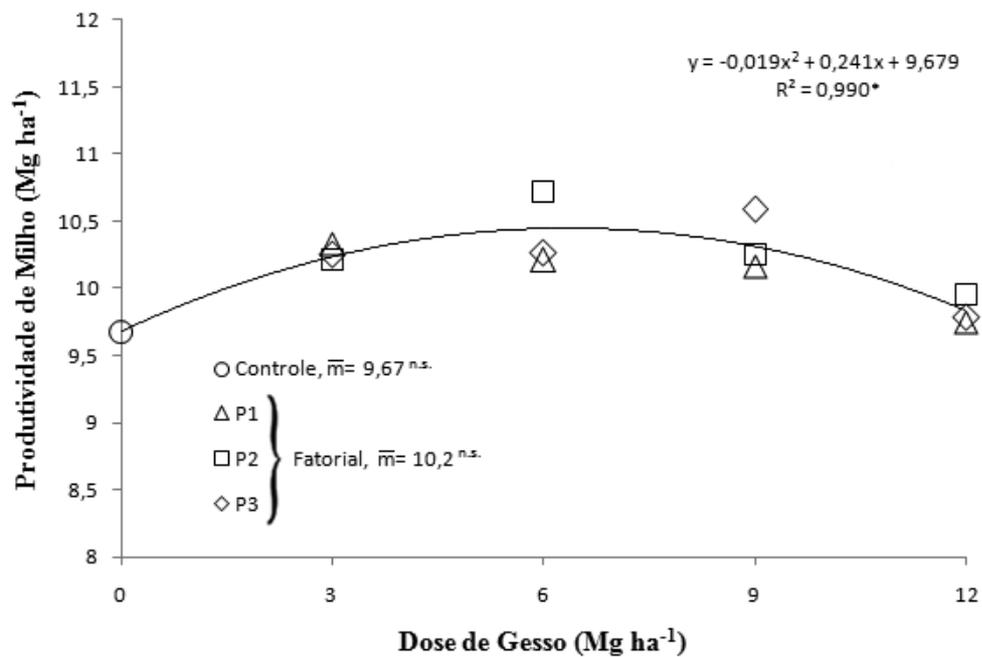


Figura 6: Produtividade de milho (Safrá 2013/14) em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola em plantio direto. * = significativo com $p < 0,05$; n.s. = não significativo.

Diferentemente da produtividade do milho (2013/2014) isoladamente, a produtividade acumulada de grãos desde o início do experimento (2009) mostrou superioridade do fatorial em relação ao controle (Figura 7), e neste caso houve efeito de parcelamento, sendo as produtividades similares entre P2 e P3, superando P1. O comportamento permaneceu quadrático frente às doses, com interação dose x parcelamento. Em P2 e P3, a queda de produtividade nas maiores doses de gesso foi menos acentuada que em P1, onde a produtividade com 9 e 12 Mg ha⁻¹ de gesso ficou abaixo do observado no tratamento controle. As doses de MET foram de 5,81, 7,27 e 7,96 Mg ha⁻¹ para P1, P2 e P3, respectivamente.

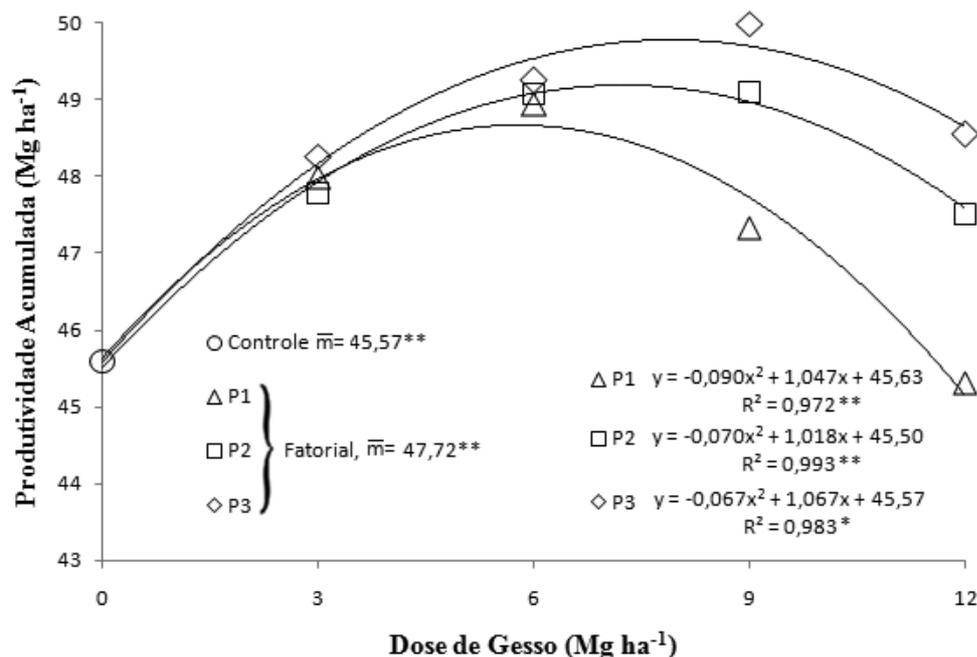


Figura 7: Produtividade acumulada de grãos no período entre 2009 e 2014 em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola em plantio direto. * e ** = significativo com $p < 0,05$ e $0,01$, respectivamente.

Em acordo com a produtividade acumulada de grãos, a renda acumulada (Figura 8) apresentou comportamento quadrático em relação às doses de gesso, com diferença entre fatorial e controle, havendo efeito de parcelamento e interação dose x parcelamento. A dose estimada para máxima renda acumulada foi 4,60, 5,63 e 6,08 Mg ha⁻¹ de gesso, para os parcelamentos P1, P2 e P3 respectivamente, portanto abaixo das doses de MET, o que está em acordo com Silva (1977), que afirma que o nível de produção mais economicamente eficiente fica abaixo do ponto de maior eficiência técnica.

Na Tabela 12, encontram-se os dados de renda acumulada a cada cultivo, demonstrados de forma evolutiva em cada tratamento entres as safras de 2009/2010 e 2013/2014. À exceção do trigo de 2012, cuja resposta produtiva às doses de gesso foi linear, com máxima em 12 Mg ha⁻¹, comportamento discutido no Capítulo I em relação ao déficit de chuvas na safra, em geral as maiores produtividades foram obtidas com 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de gesso. Por conta deste fato, associado aos custos menores com gesso e aplicação, os tratamentos com 3 e 6 Mg ha⁻¹ destacaram-se em termos de renda desde o início, recuperando consistentemente o investimento em todos os parcelamentos a partir do trigo 2011.

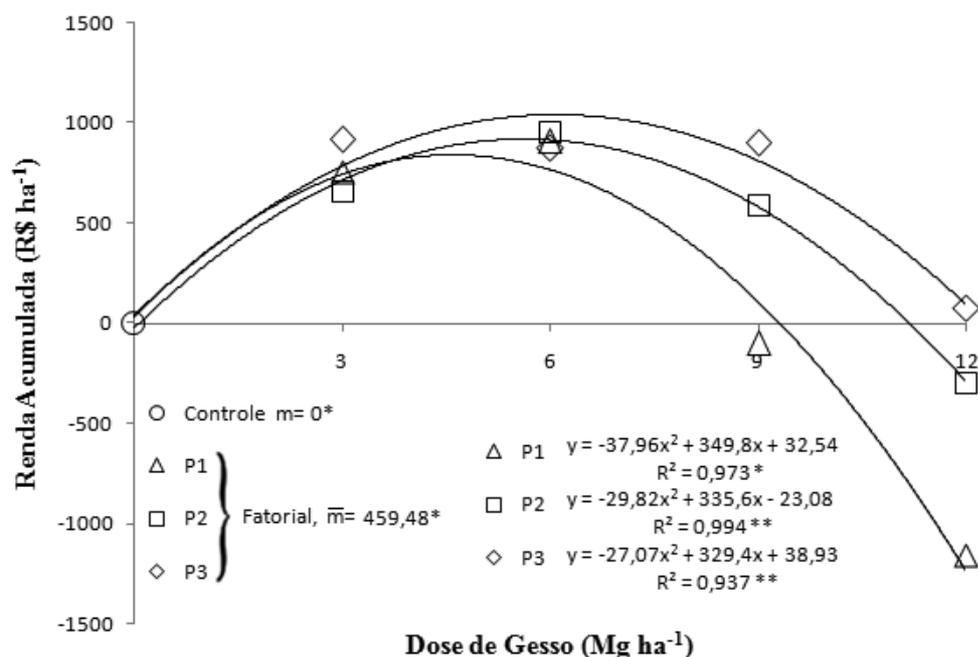


Figura 8: Renda acumulada no período entre 2009 e 2014 em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola em plantio direto. * e ** = significativo com $p < 0,05$ e $0,01$, respectivamente.

As doses de 9 e 12 Mg ha⁻¹, pelos custos mais elevados e pelo efeito negativo sobre as produtividades, sobretudo nos cultivos iniciais com 12 Mg ha⁻¹, precisaram de mais tempo para se tornarem rentáveis (tabela 12). A dose de 9 Mg ha⁻¹ passou a ser rentável primeiro em P3 no trigo 2011, depois em P2 e P3 no milho 2011/2012, mas terminou com prejuízo em P1 até o milho 2013/2014, demonstrando que a viabilidade produtiva e econômica de doses elevadas como 9 Mg ha⁻¹ depende do parcelamento, sendo mais interessante a divisão da aplicação em três anos. Já com a dose de 12 Mg ha⁻¹, do primeiro ao último cultivo em P1 e P2 houve prejuízos (renda negativa), que tornaram-se decrescentes a partir do trigo 2012, mas permitiram renda somente em P3 na soja 2012/2013 e no milho 2013/2014.

Portanto, considerando-se a economicidade dos tratamentos, as doses de 3 e 6 Mg ha⁻¹ foram as mais rentáveis, considerando os três parcelamentos, com vantagem para 6 Mg ha⁻¹ aplicada sem parcelamento (P1) ou parcelada em dois anos (P2). Para 9 Mg ha⁻¹, considerando o período avaliado, é necessário o parcelamento em dois (P2) ou três (P3) anos.

Tabela 12: Renda acumulada do sistema de produção no período entre 2009 e 2014, em função de doses e parcelamentos de gesso agrícola em plantio direto (Guarapuava-PR, 2015).

Cultura e safra	Dose de Gesso (Mg ha ⁻¹)	Renda acumulada ¹ (R\$ ha ⁻¹)		
		P1 ²	P2	P3
Milho 2009/10	0	0,00	0,00	0,00
	3	71,54	46,82	-32,88
	6	-379,66	61,46	40,50
	9	-1092,94	-135,58	41,30
	12	-1597,90	-379,66	-58,70
Cevada 2010	0	0,00	0,00	0,00
	3	276,15	151,89	61,13
	6	-86,57	311,42	184,28
	9	-960,22	69,03	218,26
	12	-1537,07	-103,16	190,15
Feijão 2010/11	0	0,00	0,00	0,00
	3	260,56	21,58	74,38
	6	69,36	46,70	-89,59
	9	-1038,19	-345,69	-93,24
	12	-1537,07	-636,69	-352,33
Trigo 2011	0	0,00	0,00	0,00
	3	405,41	187,12	383,23
	6	234,91	217,42	432,91
	9	-826,08	-123,24	274,07
	12	-1604,32	-698,77	20,15
Milho 2011/12	0	0,00	0,00	0,00
	3	547,63	215,69	443,51
	6	438,40	382,01	426,53
	9	-667,44	21,34	221,84
	12	-1540,96	-761,22	-419,10
Trigo 2012	0	0,00	0,00	0,00
	3	655,53	327,46	664,00
	6	680,24	467,92	573,26
	9	-375,94	291,74	455,30
	12	-1233,99	-427,13	-89,26
Soja 2012/13	0	0,00	0,00	0,00
	3	569,54	499,43	758,35
	6	770,53	652,78	779,55
	9	-246,97	437,91	644,46
	12	-1182,40	-366,94	71,53
Milho 2013/14	0	0,00	0,00	0,00
	3	790,40	684,23	953,23
	6	952,50	1005,65	977,52
	9	-81,39	631,58	953,62
	12	-1156,97	-272,96	110,27

¹A produtividade de cada tratamento menos a obtida sem gesso gerou um diferencial devido ao tratamento, com o qual calculou-se a receita bruta e, subtraindo-se os custos com gesso e aplicação, obteve-se a renda, que foi somada a cada novo cultivo ao longo do período; ²P1 = sem parcelamento (100% da dose em 2009); P2 = parcelamento em dois anos (50 + 50% da dose em 2009 e 2010); e P3 = parcelamento em três anos (33 + 33 + 33% da dose em 2009, 2010 e 2011);

4.6. Conclusões

No solo, o uso do gesso reduziu o Al^{3+} e aumentou Ca^{2+} e S-SO_4^{2-} , além de mobilizar Mg^{2+} a partir da camada superficial, enquanto o parcelamento reduziu a mobilização de S-SO_4^{2-} , mantendo maiores teores do nutriente até 60 cm. Em resposta, os teores foliares de Ca e S aumentaram e os de Mg diminuíram no milho com as doses, afetando quadraticamente a produtividade, que no acumulado entre 2009 e 2014 também respondeu de forma quadrática, sendo neste caso maior com parcelamento em 2 e 3 anos do que sem o parcelamento.

As maiores rendas acumuladas em relação ao controle, próximas a $\text{R}\$1000 \text{ ha}^{-1}$ no período, foram alcançadas com 6 Mg ha^{-1} de gesso em todos os parcelamentos e com 3 e 9 Mg ha^{-1} no parcelamento em três anos. Com 3 Mg ha^{-1} sem parcelamento e com 3 e 9 Mg ha^{-1} parceladas em dois anos, os valores de renda superaram o controle em cerca de $\text{R}\$630$ a $\text{R}\$790 \text{ ha}^{-1}$, prevalecendo os prejuízos com 12 Mg ha^{-1} até o final do período avaliado.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACQUA, N.H.D.; SILVA, G.P.; BENITES, V.M.; ASSIS, R.L. & SIMON, G.A. Métodos de amostragem de solos em áreas sob plantio direto no Sudoeste Goiano. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, v. 17, p. 117-122, 2013.

AGROLINK - Histórico de cotações. Disponível em: <<http://www.agrolink.com.br/cotacoes/historico/pr>> Acesso em 08/02/2015.

ALCARDE, J.A. & RODELLA, A.A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: CURTI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S. & ALVARES V., V.H., eds. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade brasileira de Ciência do Solo, p. 291-334, 2003.

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo**, Viçosa, v. 25, p. 27- 33, 2000.

BLOOM, A.J., MEYERHOFF, P.A., TAYLOR, A.R., ROST, T.L., Root Development and Absorption of Ammonium and Nitrate from the Rhizosphere. **J. Plant Growth Regul.** v. 21, p. 416-431, 2003.

BORGES, E.N. Efeito de calcário e gesso nos teores de cálcio e alumínio da camada compactada em Latossolo Vermelho-Escuro. **Pesq. Agropec. Bras.** v. 32, p. 107-114, 1997.

CAIRES, E.F.; CHUEIRI, W.A.; MADRUGA, E.F. & FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 22, n. 27-34, 1998.

CAIRES, E.F., FONSECA, A.F., MENDES, J., CHUEIRI, W.A., MADRUGA, E.F., Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**. v. 23, p. 315-327, 1999.

CAIRES, E.F., FELDHAUS, I.C., BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em

função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**. v. 60, p. 213-223, 2001.

CAIRES, E.F., FELDHAUS, I.C., BARTH, G., GARBUIO, F.J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Sci. agric**. v. 59, p. 357-364, 2002.

CAIRES, E.F., BLUM, J., BARTH, G., GARBUIO, F.J., KUSMAN, M.T., Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema de plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**. v.27, p. 275-286, 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. **R. Bras. Ci. Solo**. v. 28, p. 125-136, 2004.

CAIRES, E.F.; CHURKA, S.; GARBUIO, F.J.; FERRARI, R.A.; MORGANO, M.A. Soybean yield and quality a function of lime and gypsum applications. **Sci. Agric**. v. 63, p. 370-379, 2006.

CAIRES, E.F., MASCHIETTO, E.H.G., GARBUIO, F. J., CHURKA, S., JORIS, H.A.W., Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Sci. Agric**. v. 68, p. 209-216, 2011a.

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 Manage**. v. 27, p. 45-53, 2011b.

CAIRES, E.F., GARBUIO, F.J., CHURKA, S., JORIS, H.A.W. Use of gypsum for crop grain production under a sub-tropical no-till cropping system. **Agron. J**. v. 103, p. 1804-1814, 2011c.

CAMARGO, O.A. & RAIJ, B. van. Movimento de gesso em amostras de Latossolos com diferentes propriedades eletroquímicas. **R. Bras. Ci. Solo**. v. 13, p. 275-280, 1989.

CANTARELLA, H.; PROCHNOW, L. I. Determinação de sulfato em solos. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A., eds. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, p. 225-230, 2001.

CARVALHO, M.C.S.; RAIJ, B.V. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. **Plant Soil**. v. 192, p. 37-48, 1997.

CASAGRANDE, J.C.; ALLEONI, L.R.F.; CAMARGO, O.A. & BORGES, M. Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas variáveis. **R. Bras. Ci. Solo**. v. 27, p. 51-59, 2003.

CHAVES, J.C.D.; PAVAN, A.M.; MIYAZAWA, M. Redução da acidez subsuperficial em coluna de solo. **Pesq. Agropec. Bras.** Brasília, v.23, n.5, p.469-76, 1988.

COSTA, S.E.V.G.A.; SOUZA, E.D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; C.A.O, E.G. & HOLZSCHUH, M.J. Phosphorus and root distribution and corn growth as related to longterm tillage systems and fertilizer placement. **R. Bras. Ci. Solo**, 33:1237-1247, 2009.

CQFS, COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10. ed. Porto Alegre, 2004.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; BACALTCHUK, B.; SATTLER, A.; DENARDIN, N.D'A.; FAGANELLO, A. & WIETHÖLTER, S. Sistema plantio direto: Fator de potencialidade da agricultura tropical brasileira. In: ALBUQUERQUE, A.C.S. & SILVA, A.G. (eds.) Agricultura tropical: Quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2008. v. 1, p. 1251-1273

DERPSCH, R., FRIEDRICH, T., Global overview of conservation agriculture adoption. In: Joshi PK (ed), Lead Papers. p. 429–438, 2009.

EBELING, A.G., ANJOS, L.H.C., PEREZ, D.V., PEREIRA, M.G., VALLADARES, G.S. Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. **Bragantia**. v. 67, p. 429-439, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, Produção de Informações, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, Embrapa informação tecnológica, 2009. 627p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Rio de Janeiro, 2013. 353p.

ERNANI, P.R., RIBEIRO, M.S., BAYER, C. Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola. **Sci. agric.** v. 58, p. 825-831, 2001.

FERNANDES, M.S. & SOUZA, S.R. Absorção de nutrientes. In: FERNANDES, M. S., ed. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 115-152.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO - CA Adoption Worldwide. Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/ca/6c.html>> Acesso em 23 setembro 2014.

FOLONI, J.S.S.; SANTOS, D.H.; CRESTE, J.E.; SALVADOR, J.P. Resposta do feijoeiro e fertilidade do solo em função de altas doses de calcário em interação com a gessagem. **Colloquium Agrariae**, v. 4, p. 27-35, 2008.

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

IAPAR - Instituto Agrônomo do Paraná. Cartas Climáticas do Paraná, Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=597>> Acesso em 11/02/2015

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. Sistema IBGE de Recuperação automática. **Produção agrícola municipal, 1990-2011**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp>>. Acesso em 25/07/2013.

KLEIN, V.A.; DALLMEYER, A.U.; ESCOSTEGUY, P.A.V.; BOLLER, W.; FIOREZE, I.; VIEIRA, M.L.; DURIGON, F.F.; FÁVERO, F. Adaptação de um equipamento para

- incorporação de calcário em solos sob plantio direto. **R. Ciê. Agrovet.** v. 6, p. 95-103, 2007.
- KLEIN, V.A. Gradiente químico de solos sob plantio direto: uma condição que limita a produtividade das plantas. **R. Plant. Dir.** v. 126, 2011.
- KRAMER, L.F.M., MÜLLER, M.M.L., TORMENA, C.A., GENÚ, A.M., MICHALOVICZ, L. & VICENSI, M. Atributos químicos do solo associados à produtividade do trigo em um talhão com diferentes potenciais produtivos. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 38, p. 1190-1199, 2014.
- LOPES, A.S, GUILHERME, L.R.G. Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas; aspectos agronomicos. Sao Paulo: ANDA, 2000. 70p. (ANDA. Boletim Tecnico, 4).
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.
- MAPA - MINISTÉRIO DA PECUÁRIA, AGRICULTURA E ABASTECIMENTO - **MAPA**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/exportacao>> Acesso em: 28 mai. 2014.
- MEDEIROS, J.C.; ALBUQUERQUE, J.A.; MAFRA, A.L.; DALLA ROSA, J.; GATIBONI, L.C. Calcium: magnesium ratio in amendments of soil acidity: nutrition and initial development of corn plants in a Humic Alic Cambisol. **Semin-Ciênc Agrár.** v. 29, p. 799-806, 2008.
- MICHALOVICZ, L. Atributos químicos do solo e resposta da sucessão milho-cevada-feijão-trigo influenciados por doses e parcelamento de gesso em plantio direto. 2012. 54 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2012.
- NEIS, L., PAULINO, H.B., SOUZA, E.D., REIS, E.F., PINTO, F.A., Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. **R. Bras. Ci. Solo.** v. 34, p. 409-416, 2010.
- NIAZI, B.H., HUSSAIN, N., SALIM, M., HASSAN, G., ALI, A. Effect of split application of gypsum on wheat yield and properties of a saline-sodic soil irrigated with brackish water. **Int. J. Agri. Biol.** v. 2, p. 234-236, 2000.

NOGUEIRA, M.A. & MELO, W.J. Enxofre disponível para a soja e atividade de arilsulfatase em solo tratado com gesso agrícola. **R. Bras. Ci. Solo.** v. 27, p. 655-663, 2003.

NUNES, M.R.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A.; PAULETTO, E.A. & PINTO, L.F.S. Efeito de semeadora com haste sulcadora para ação profunda em solo manejado com plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo.** v. 38, p. 627-638, 2014.

NUNES, R.S.; SOUSA, D.M.G.; GOEDERT, W.J. & VIVALDI, L.J. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **R. Bras. Ci. Solo**, 35:877-888, 2011.

OLIVEIRA, E.L. & PAVAN, M.A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil Till. Res.** 38:47- 7, 1996.

OLIVEIRA, E.L. de. **Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no estado do Paraná.** Londrina, IAPAR, 2003. 30p. (Circular nº 128)

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. & PRATT, P.F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium, and aluminum following lime and gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 48, p. 33-38, 1984.

PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F. de.; ZEMPULSKI, H. da C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D.C. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade.** Londrina : IAPAR, 1992. 40 p. (IAPAR. Circular 76).

PRADO, R.M. **Nutrição de plantas.** 1. São Paulo, Ed. UNESP, 2008. 407p.

PUJOL, S.B., Emissão de amônia e dinâmica do nitrogênio no solo com parcelamento da dose e adição de inibidor de nitrificação em dejetos de suínos. 2012. 101 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

QUAGGIO, J.A., RAIJ, B. van, GALLO, P.B., MASCARENHAS, H.A.A. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesq. Agropec. Bras.** v. 28, p. 375-383, 1993.

RAIJ, B. van., FURLANI, P.R., QUAGGIO, J.A., PETTINELLI JR, A. Gesso na produção de

cultivares de milho com tolerância diferencial a alumínio em três níveis de calagem. **R. Bras. Ci. Solo.** v. 22, p. 101-108, 1998.

RAIJ, B van. **Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo.** São Paulo: ANDA, 1988, 88p.

RAIJ, B van. **Gesso na agricultura.** Campinas: Instituto Agronômico, 2008, 233p.

RAIJ, B. van; MASCARENHAS, H.A.A.; PEREIRA, J.C.V.N.A.; IGUE, T.; SORDI, G. Efeito de calcário e de gesso para a soja cultivada em Latossolo Roxo ácido saturado com sulfato. **R. Bras. Ci. Solo,** Campinas, v.18, p.305-312, 1994.

RAIJ, B. van. **Reações de gesso em solos ácidos.** In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., Uberaba, 1992. Anais. Uberaba, IBRAFOS, 1992. p. 105-119.

RAMOS, L.A., NOLLA, A., KORNDÖRFER, G.H., PEREIRA, H.S., CAMARGO, M.S. Reatividade de corretivos de acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **R. Bras. Ci. Solo.** v. 30, p. 849-857, 2006.

RAMPIM, L., LANA, M.C., FRANDOLOSO, J.F., FONTANIVA, S. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema de semeadura direta. **R. Bras. Ci. Solo.** v.35, p. 1687-1698, 2011.

RASHID, M., IQBAL, M.N., AKRAM, M., ANSAR, M., HUSSAIN, R. Role of gypsum in wheat production in rainfed areas. **Soil Environm.** v. 27, p. 166-170, 2008.

REEVE, N.G. & SUMNER, M.E. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface-applied amendments. **Agrochemophysica.** v. 4, p. 1-6, 1972.

RHEINHEIMER, D.S., SANTOS, E.J.S., KAMINSKI, J., BORTOLUZZI, E.C., GATIBONI, L.C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **R. Bras. Ci. Solo,** v. 24. p. 301-309, 2000.

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

SEAB/DERAL - Produção Agropecuária no estado do Paraná. Disponível em: <<http://www.agricultura.pr.gov.br/modules/noticias/article.phpstoryid=5700>> Acesso em 20/01/2015.

SILVA, P.R. Eficiência técnica VS Eficiência econômica. **Ciê. Agron.** v.7, p.157-163, 1977.

SHARP, R.E. Interaction with ethylene: changing views on the role of abscisic acid in root and shoot growth responses to water stress. **Plant Cell Environ.** v. 25, p. 211-222, 2002.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C; MELLO, F. F de. C. Componentes da produção e produtividade de cultivares de arroz e feijão em função de calcário e gesso aplicados na superfície do solo. **Bragantia**, v. 69, p. 965-974, 2010.

SORATTO, R.P., CRUSCIOL, C.A.C., Nutrição e produtividade de grãos de aveia-preta em função da aplicação de calcário e gesso em superfície na implantação do sistema de plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo.** v. 32, p. 715-725, 2008.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. & REIN, T.A. **Uso do gesso agrícola nos solos dos Cerrados**. Planaltina, EMBRAPA-CPAC, 1996. 20p. (Circular Técnica 32)

SOUSA, D.M.G. & RITCHEY, K.D. **Uso de gesso no solo de cerrado**. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1., Brasília, 1986. Anais. Brasília, EMBRAPA- DDT, 1986. p.119-144.

SPERA, S.T.; ESCOSTEGUY, P.A.V.; DENARDIN, J.E.; KLEIN, V.A. & SANTOS, H.P. Atributos químicos restritivos de Latossolo Vermelho distrófico e tipos de manejo de solo e rotação de culturas. **R. Agr.**, v. 4, p. 324-334, 2011.

TANG, C., RENGEL, Z., DIATLOFF, E., GAZEY, C. Responses of wheat and barley to liming on a sandy soil with subsoil acidity. **Field Crop Res.** v. 80, p. 235–244, 2003.

TOMA, M.; SUMNER, M.; WEEKS, G. & SAIGUSA, M. Long-term Effects of Gypsum on Crop Yield and Subsoil Chemical Properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 63, p. 891-895, 1999.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. & SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciado por calagem, preparo inicial e tráfego. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 22. p.301-309, 1998.

VENZKE FILHO, S.P.; FEIGL, B.J.; PICCOLO, M.C.; SIQUEIRA NETO, M. & CERRI,

C.C. Biomassa microbiana do solo em sistema de plantio direto na região de Campos Gerais – Tibagi, PR. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32, p. 599-610, 2008.

VITTI, G.C. **Uso eficiente do gesso agrícola na agropecuária**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2000. 30p.

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 de plantio direto. **Ciênc. Rural**. v.37, p. 110-117, 2007.

ANEXO I

Efeito de doses e parcelamentos (P1, P2 e P3)* de gesso agrícola em plantio direto sobre a produtividade de grãos e o retorno econômico entre 2009 e 2014 (Guarapuava-PR, 2015).

	Dose de Gesso Mg ha ⁻¹	Produtividade (Mg ha ⁻¹)			Receita Bruta pelo uso do gesso por safra (R\$ ha ⁻¹)			Somatório do retorno econômico (R\$ ha ⁻¹)		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Milho 2009/10	0	9,85	9,85	9,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	10,99	10,47	10,08	370,50	201,50	76,05	59,00	40,00	-35,45
	6	10,54	10,96	10,60	224,25	360,75	243,75	-387,25	49,25	32,25
	9	9,31	10,82	10,90	-175,50	315,25	341,25	-1087,00	-146,25	29,75
	12	8,70	10,54	10,90	-373,75	224,25	341,25	-1585,25	-387,25	-70,25
Cevada 2010	0	4,34	4,34	4,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	4,71	4,53	4,51	199,74	102,57	91,77	258,74	142,57	56,32
	6	4,87	4,79	4,49	286,11	244,00	140,36	-101,14	293,25	172,61
	9	4,58	4,71	4,66	129,56	199,74	172,75	-957,44	53,49	202,50
	12	4,45	4,84	4,79	59,38	269,92	242,93	-1525,87	-117,33	172,68
Feijão 2010/11	0	2,08	2,08	2,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	2,07	2,10	2,16	-15,05	30,11	120,43	243,69	11,18	65,25
	6	2,18	2,11	2,04	150,53	45,16	-60,21	49,40	26,91	-99,11
	9	2,03	2,11	2,08	-75,27	45,16	0,00	-1032,71	-362,85	-109,00
	12	2,08	2,13	2,00	0,00	75,27	-126,45	-1525,87	-653,57	-365,27
Trigo 2011	0	4,11	4,11	4,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	4,39	4,43	4,71	141,45	161,65	301,58	385,13	172,83	366,83
	6	4,43	4,44	5,12	161,65	166,71	510,22	211,05	193,62	411,11
	9	4,52	4,54	4,82	207,12	217,22	358,67	-825,59	-145,63	249,67
	12	3,98	3,99	4,83	-65,67	-60,62	363,72	-1591,54	-714,19	-1,55
Milho 2011/12	0	10,34	10,34	10,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	10,76	10,42	10,85	137,56	27,63	166,16	522,69	200,46	421,49
	6	10,95	10,83	10,95	196,83	159,20	198,40	407,88	352,82	398,01
	9	10,81	10,77	11,11	153,45	139,84	250,79	-672,14	-5,79	188,95
	12	10,53	10,15	10,26	61,29	-60,40	-26,84	-1530,25	-774,58	-439,89
Trigo 2012	0	2,01	2,01	2,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	2,22	2,23	2,44	105,36	109,15	215,30	628,05	309,60	636,79
	6	2,48	2,18	2,30	236,16	83,89	143,29	644,03	436,71	541,30
	9	2,58	2,54	2,47	284,64	264,05	227,97	-387,50	258,26	416,92
	12	2,61	2,66	2,65	299,75	326,23	322,08	-1230,50	-448,35	-117,81
Soja 2012/13	0	3,16	3,16	3,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	3,06	3,36	3,27	-83,75	167,50	91,90	544,30	477,10	728,69
	6	3,27	3,38	3,40	87,94	180,06	200,92	731,97	616,77	742,22
	9	3,31	3,33	3,38	125,63	142,38	184,25	-261,88	400,63	601,17
	12	3,22	3,23	3,35	50,25	58,62	156,61	-1180,25	-389,73	38,80
Milho 2013/14	0	9,67	9,67	9,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	10,33	10,22	10,25	213,62	178,75	188,50	757,93	655,85	917,19
	6	10,21	10,72	10,26	176,02	341,32	191,49	907,99	958,09	933,71
	9	10,16	10,25	10,59	160,16	187,33	299,03	-101,72	587,96	900,20
	12	9,75	9,95	9,78	24,60	90,90	37,47	-1155,65	-298,83	76,28

*P1 = sem parcelamento (100% das doses em novembro de 2009); P2 = parcelamento em dois anos (50 + 50% das doses em novembro de 2009 e 2010); e P3 = parcelamento em três anos (33 + 33 + 33% das doses em novembro de 2009, 2010 e 2011);