

IGOR TENÓRIO MARINHO DA ROCHA

**GESSO MINERAL NO CONDICIONAMENTO DE SUBSOLO E NA  
PRODUÇÃO DE SORGO EM PERNAMBUCO**

RECIFE-PE  
MARÇO DE 2013

IGOR TENÓRIO MARINHO DA ROCHA

**GESSO MINERAL NO CONDICIONAMENTO DE SUBSOLO E NA  
PRODUÇÃO DE SORGO EM PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

RECIFE-PE  
MARÇO DE 2013

Ficha Catalográfica

R672g Rocha, Igor Tenório Marinho da  
Gesso mineral no condicionamento de subsolo e na  
produção de sorgo em Pernambuco / Igor Tenório Marinho da  
Rocha. -- Recife, 2013.  
81 f.: il.

Orientador (a): Fernando José Freire.  
Dissertação (Mestrado Ciência do Solo) – Universidade  
Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia,  
Recife, 2013.

Inclui referências e apêndice.

1. Gessagem 2. Sorgo 3. Extração de nutrientes  
4. Reservatórios de alumínio I. Freire, Fernando José,  
Orientador II. Título

CDD 631.4

IGOR TENÓRIO MARINHO DA ROCHA

**GESSO MINERAL NO CONDICIONAMENTO DE SUBSOLO E NA  
PRODUÇÃO DE SORGO EM PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

Dissertação defendida e aprovada em 01 de março de 2013.

Orientador:

---

Dr. Fernando José Freire

Examinadores:

---

Dr. Alexandre Tavares da Rocha

---

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto

---

Dr. Edivan Rodrigues de Souza

## BIOGRAFIA

**Igor Tenório Marinho da Rocha** nasceu em Maceió - Alagoas no dia 30 de setembro do ano de 1987. No ano de 2007, com 19 anos de vida, ingressou no curso de graduação em Agronomia da Universidade Federal de Alagoas se formando e obtendo o título de Engenheiro Agrônomo no ano de 2011. Durante a graduação despertou, logo no primeiro período, o desejo de realizar a pós-graduação. De início estagiou na área de Fitopatologia, área esta que até hoje motiva sua curiosidade, mas que foi substituída pela paixão das ciências do solo, em especial a Fertilidade do Solo. Ainda na graduação foi monitor das disciplinas de Bioquímica e de Fertilidade do Solo. Além de ter sido colaborador e bolsista de iniciação científica. Durante todo o curso participou e foi membro do Grupo Agroecológico Craibeiras, grupo este que guarda vários ensinamentos e amizades. Ingressou em Março de 2011 no Curso de Mestrado em Ciências do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco concluindo em Março de 2013.

A Deus por mais uma conquista, para honra e glória do Teu nome. Aos meus pais (Fernando e Tânia) e meus irmãos (Welker, Fernanda, Marina e Witaynanda). Obrigado pelo incentivo e carinho.

**DEDICO E OFEREÇO.**

## AGREDECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais uma conquista.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo (PPGCS/UFRPE) o qual possibilitou a realização de mais um sonho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela disponibilização da bolsa de estudo.

A Estação de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC/UFRE) por todo apoio disponibilizado durante o experimento. Meus agradecimentos a Djalma Euzébio, Geraldo, Rafael, Kelly e toda a equipe da EECAC que ajudou direta ou indiretamente na realização do experimento.

A Usina Petribu pela concessão do gesso utilizado no experimento e análises laboratoriais.

Ao Instituto de Pesquisa Agropecuária do Estado de Pernambuco (IPA) na pessoa do Dr. Tabosa pela concessão do material vegetal utilizado neste trabalho.

Ao professor Fernando Freire pela oportunidade de trabalho e orientação acadêmica e aos conselheiros Edivan Souza e Maria Betânia por toda a ajuda durante a execução do trabalho.

Ao professor Brivaldo Almeida, Mario Lira Júnior e todos os professores do PPGCS/UFRPE que possibilitaram a realização deste mestrado.

Ao professor José Paulo Vieira da Costa por todos os ensinamentos transmitidos durante a minha graduação na Universidade Federal de Alagoas, pelo exemplo profissional e amizade.

A todos os estagiários do Laboratório de Química e Física do Solo em especial agradeço a Nathalia Sobral, Robson, Fabíola, Jonatham, Patrícia e Maércio por toda ajuda.

Aos técnicos administrativos Maria do Socorro e Josué por toda atenção e amizade nas correrias do dia a dia além de fazerem o melhor cafezinho da UFRPE.

Aos amigos de turma: Flávio Silveira, Remy Farias, Ygor e Yuri Jacques, Monaliza Alves, Esmeralda Lopes, Camila Lapenda, Maikon, Janyelle e Diego e demais colegas do PPGCS pelos bons momentos.

A minha namorada e companheira Anibia Silva por toda paciência e compreensão.

Aos bons amigos Javan Sami, Vitor Fleming, Leonardo, Danilo e Thales por todos os bons momentos.

A todos os integrantes da banda Loks (Yrlan, Ottoniel e Thiago) muito Lock'nLoLL, sempre!!

Obrigado.



## Sumário

Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas .....	xii
Resumo.....	xiii
Abstract.....	xiv
1. Introdução.....	15
2. Revisão Bibliográfica .....	17
2.1. Acidez de Solos tropicais .....	17
2.2. Efeitos do Alumínio nas Plantas .....	18
2.3. Gesso Mineral.....	19
2.4. Mecanismos de correção da acidez subsuperficial .....	21
2.5. Ação do gesso nas características químicas e físicas do solo e na extração de nutrientes e produtividade agrícola.....	23
2.6. O Sorgo Sacarino ( <i>Sorghum bicolor moench.</i> ).....	26
2.7. Utilização de sorgo sacarino para a produção de biocombustíveis .....	28
3. Material e Métodos.....	31
3.2. Definição e aplicação dos tratamentos.....	33
3.3. Avaliação das variáveis químicas do solo.....	34
3.4. Avaliação das variáveis físicas do solo .....	35
3.5. Avaliação das diferentes formas de Alumínio.....	36
3.6. Plantio do sorgo sacarino .....	37
Em que:.....	39
3.8. Análises estatísticas .....	39
4. Resultados e Discussão.....	41
4.1. Alteração de atributos químicos do solo pela aplicação de doses crescentes de gesso mineral e tempo de contato no solo.....	41
4.2. Alteração de atributos físicos do solo pela aplicação de doses crescentes de gesso mineral.....	54

4.3. Alteração nos reservatórios de alumínio pela aplicação de doses crescentes de gesso mineral e seu tempo de contato no solo .....	56
4.4. Produtividade, extração de nutrientes e características agrotecnológicas do sorgo influenciadas pela aplicação de doses crescentes de gesso mineral .....	60
5. Conclusão.....	68
6. Referências Bibliográficas .....	69

## Lista de Figuras

Figura 1. Distribuição da precipitação pluviométrica e quantidade de água aplicada por irrigação durante o período do ensaio de campo. ....	33
Figura 2. Distribuição a lanço e na superfície do gesso mineral nas parcelas do ensaio de acordo com os tratamentos. ....	34
Figura 3: Regressões dos teores de cálcio trocável em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato dele com o solo em diferentes profundidades. ....	46
Figura 4. Regressões dos teores de potássio trocável em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato com o solo em diferentes profundidades. ....	48
Figura 5. Regressões dos teores de magnésio trocável em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato dele com o solo em diferentes profundidades. ....	49
Figura 6. Regressões dos teores de alumínio trocável em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato dele com o solo em diferentes profundidades. ....	50
Figura 7. Regressões dos valores da saturação por alumínio em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato dele com o solo em diferentes profundidades.....	51
Figura 8. Regressões dos teores de sulfato em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato dele com o solo em diferentes profundidades. ....	52
Figura 9. Regressões dos valores de pH em água em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato dele com o solo em diferentes profundidades. ....	53
Figura 10. Regressões dos valores de pH em cloreto de cálcio em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato com o solo em diferentes profundidades. ....	54
Figura 11. Regressão dos valores da percentagem de agregados com diâmetro médio entre 0,5 e 1,0 mm em função da aplicação de diferentes doses de gesso. ....	56
Figura 12. Teor de cálcio, potássio, nitrogênio e fósforo em função da aplicação de doses crescentes de gesso mineral.....	61
Figura 13. Conteúdo de cálcio, magnésio e sulfato em função da aplicação de doses crescentes de gesso mineral.....	62
Figura 14. Produção de massa verde do sorgo sacarino em função da aplicação de doses crescentes de gesso mineral.....	63
Figura 15. Produção de massa seca do sorgo sacarino em função da aplicação de doses crescentes de gesso mineral.....	64
Figura 16. Produção de etanol por hectare em função da aplicação de doses crescentes de gesso mineral. ....	66

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Atributos químicos e físicos do solo da área experimental em diferentes profundidades antes da aplicação dos tratamentos .....	32
Tabela 2. Teores trocáveis de cálcio, magnésio e potássio em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral e tempos de contato no solo em três profundidades, análises de variância e coeficiente de variação dos dados .....	43
Tabela 3. Teores trocáveis de alumínio, saturação por alumínio e teores de sulfato em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral e tempos de contato no solo em três profundidades, análise da variância e coeficiente de variação dos dados.....	44
Tabela 4. pH em água e cloreto de cálcio em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral e tempos de contato dele no solo em três profundidades, análise da variância e coeficiente de variação dos dados.....	45
Tabela 5. Diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico, índice de estabilidade de agregados, macro e microporosidade e percentagem de agregados em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral em Argissolo amarelo distrocoeso, análise da variância e coeficiente de variação dos dados .....	55
Tabela 6. Teores de alumínio extraído com oxalato ácido de amônio (OAA), pirofosfato de sódio (Prifosfato) e ditonito citrato bicarbonato (DCB) em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral e de diferentes tempo de contato do gesso com o solo em três profundidades, análise da variância e coeficiente de variação dos dados.....	59
Tabela 7. Teor e conteúdo de nutrientes no sorgo sacarino ao final do ciclo de cultivo em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral.....	60
Tabela 8. Características agrotecnológicas do sorgo sacarino em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral .....	65

## Resumo

ROCHA, Igor Tenório Marinho da. Mcs. Pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, março de 2013. Gesso mineral no condicionamento de subsolo e na produção de sorgo em Pernambuco. Orientador: Dr. Fernando José Freire. Conselheiros: Dr<sup>a</sup>. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire e Dr. Edivan Rodrigues de Souza.

A acidez subsuperficial em solos brasileiros é um dos principais fatores que ocasionam redução na produtividade das culturas e está intimamente relacionada a elevadas concentrações de  $Al^{3+}$ . Uma alternativa eficaz e viável para sua redução é a aplicação de gesso. Nesse sentido, o objetivo desse ensaio foi investigar os efeitos da aplicação e tempo de contato do gesso com o solo em propriedades químicas (Ca, Mg, K, Al,  $SO_4^{2-}$ , pH água e pH  $CaCl_2$ ) e físicas (estabilidade de agregados em água, DMP, DMG, IEA e micro e macroporosidade), verificar possíveis alterações nos diferentes compartimentos de Al do solo (Al amorfo, Al ligado a matéria orgânica e Al cristalino) e produtividade, absorção de nutrientes (Ca, Mg, K, S, P e N) e características agrotecnológicas do sorgo influenciada por doses de gesso mineral. Um ensaio em campo foi montado em delineamento em blocos ao acaso. Avaliou-se a aplicação de 0, 2, 4, 6 e 8 t  $ha^{-1}$  de gesso em três profundidades (0,0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m) em quatro períodos [antes da aplicação de gesso (0), 15, 64 e 90 dias após a aplicação do gesso] para as características químicas do solo. Aos 5 meses após a aplicação de gesso as características físicas do solo foram avaliadas. Nas parcelas que receberam 0, 4 e 8 t  $ha^{-1}$  de gesso e aos 0 e 15 dias após a aplicação as formas de Al no solo foram avaliadas e foi avaliado o efeito das doses de gesso na produção, absorção de nutrientes e características agrotecnológicas do sorgo. A aplicação de gesso mineral promoveu alterações nas características químicas do solo em todo o perfil de solo (0-0,6 m) elevando os teores de Ca e  $SO_4^{2-}$  e reduziu, em subsuperfície, os teores de  $Al^{3+}$  e sua saturação. Não promoveu lixiviação de  $K^+$  e  $Mg^{2+}$  e não promoveu alteração na agregação do solo e sua estabilidade. Aumentando o tempo de contato do gesso mineral com o solo, maior efeito de sua atuação foi observada, principalmente na elevação dos teores de Ca trocável em subsuperfície. Houve aumento das formas amorfas de Al em subsuperfície, redução das formas ligadas à matéria orgânica e não houve interferência nas formas cristalinas de Al no perfil do solo. Observou-se incremento na absorção de Ca e redução da absorção K, além de aumento da produtividade do sorgo. Não houve interferência nas variáveis agrotecnológicas do sorgo sacarino.

Palavras-chave: gessagem, sorgo, extração de nutrientes, reservatórios de alumínio

## Abstract

ROCHA, Igor Tenório Marinho da. Mcs. At Federal Rural University of Pernambuco, March 2013. Mineral gypsum subsoil conditioning and production of sorghum in Pernambuco. Adviser: Dr. Fernando José Freire. Adviseres: Dr<sup>a</sup>. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire e Dr. Edivan Rodrigues de Souza.

Subsurface acidity in Brazilian soils is one of the main factors that cause crop yield reduction and is closely related to high concentrations of  $\text{Al}^{3+}$  in depth in the soil. An effective and viable alternative to reduction or elimination of subsurface acidity is to apply gypsum in the soil. In this sense, the objective of this trial was to investigate the effects of gypsum application and time of contact in the soil chemical (Ca, Mg, K, Al,  $\text{SO}_4^{2-}$ , pH water e pH  $\text{CaCl}_2$ ) and physical (water aggregate stability, MWD, GMD, SAI and micro and macroporosity), assess possible changes in different Al pools (amorphous Al, organic matter bound Al and crystalline Al) and productivity, nutrient uptake (Ca, Mg, K, S, P and N) and agrotechnological variables of sorghum influenced by rates of mineral gypsum. A field test was set up in randomized block design. It was evaluated the application of 0, 2, 4, 6 and 8 t ha<sup>-1</sup> of gypsum at three depths (0.0-0.2, 0.2-0.4 and 0.4-0.6 m) in four times [before applying gypsum (0), 15, 64 and 90 days after applying gypsum] to the chemical characteristics of the soil. 5 months after gypsum application soil physical characteristics was evaluated. In plots that received 0, 4 and 8 t ha<sup>-1</sup> of gypsum and at 0 and 15 days after application Al forms in the soil were evaluated and was evaluated the effect of gypsum rates in the production, nutrient uptake and agrotechnological characteristics of sorghum. Mineral gypsum application promoted changes in soil chemical characteristics throughout the soil profile (0-0.6 m) by raising the levels of Ca and  $\text{SO}_4^{2-}$  and reduced, in the subsoil,  $\text{Al}^{3+}$  concentrations and its saturation. It not promoted  $\text{K}^+$  and  $\text{Mg}^{2+}$  leaching and did not promote changes in soil aggregation and stability. Increasing the time of mineral gypsum contact with the soil, greater effect of its performance was observed mainly the rise in exchangeable Ca in subsurface. There was increase of amorphous forms of Al in the subsurface, reduction of forms bounded to organic matter and there was no interference in the crystalline forms of Al in the soil profile. It was observed increase in Ca uptake and reduction in K uptake, besides increasing sorghum productivity. There was no interference in the agrotechnological variables of sweet sorghum.

Keywords: surface application of gypsum, sorghum, nutrient uptake, aluminum pools

## 1. Introdução

O crescimento da população mundial em proporções aceleradas tem causado preocupações com a disponibilidade de alimentos, água e energia para suprir as necessidades de um planeta super-habitado.

A produção de biocombustíveis por meio de culturas agroenergéticas, ou seja, cultivos utilizados para produção de energia é uma alternativa ao uso dos combustíveis derivados do petróleo. Por não ser renovável como o são os biocombustíveis, os combustíveis derivados do petróleo podem, em breve, se exaurir (Ragauskas *et al.*, 2006; Nogueira, 2011).

A agricultura, além de se preocupar com a produção de alimentos, nas últimas décadas tem dado destaque também à produção de energia. A produtividade das culturas, seja ela utilizada para a alimentação ou produção de energia, está condicionada pela ação de fatores como o clima, espécie ou variedade vegetal, sanidade vegetal e, em especial, os solos e suas condições de fertilidade, principalmente as que se relacionam com a acidez e a presença de elementos que em elevadas concentrações são tóxicos, como o  $\text{Al}^{3+}$  em subsuperfície (Zaifnejad *et al.*, 1997; Musser *et al.*, 2005; Meurer, 2007; Motta e Melo, 2009).

Grande parte dos solos do Brasil e do Estado de Pernambuco são ácidos, apresentando baixos valores de pH em superfície e subsuperfície, e teores de  $\text{Al}^{3+}$  em níveis tóxicos em subsuperfície, além de baixos teores de cátions básicos como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ .

A correção da acidez do solo e dos teores de  $\text{Al}^{3+}$  em níveis tóxicos usualmente é realizada com a prática da calagem. Contudo, o efeito da calagem na redução da acidez e nas concentrações de  $\text{Al}^{3+}$  em nível tóxico no solo restringe-se as camadas superficiais, exceto quando se utiliza máquinas que proporcionam sua incorporação em profundidade, o que onera substancialmente o manejo.

Diante da preocupação com a produção agrícola é indispensável que o solo seja adequadamente avaliado quanto a sua capacidade produtiva. Neste sentido, a acidificação do solo, em especial em subsuperfície, merece

destaque, pela dificuldade de se encontrar meios de correção em profundidades abaixo dos 0,2 m. Devido a grande quantidade de solos brasileiros apresentarem caráter ácido em subsuperfície, métodos como a gessagem constituem importante alternativa de manejo para melhoria da qualidade do solo e incremento da produtividade agrícola.

Uma prática que pode melhorar as condições de acidez subsuperficial no solo sem o uso de máquinas é a gessagem. O gesso é um mineral sulfatado de Ca ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) com maior solubilidade do que o calcário ( $\text{CaCO}_3$ ). Devido a esta maior solubilidade, o gesso é preferível quando se almeja maior distribuição de Ca no perfil do solo, diminuição da saturação por Al e redução dos teores de  $\text{Al}^{3+}$  em nível tóxico em subsuperfície (Caires *et al.*, 2003; Da Silva *et al.*, 2010).

As culturas possuem respostas diferenciadas à gessagem do solo. Ocorrendo acréscimo ou mesmo ausência de efeitos no aumento de sua produtividade. Deste modo, pesquisas com culturas e em ambientes específicos são necessárias na investigação de resposta ou não ao manejo da gessagem.

Este trabalho teve como objetivo avaliar as modificações nas propriedades químicas, físicas e nos reservatórios de Al em profundidade e ao longo do tempo de um Argissolo Amarelo distrocoeso, submetido a diferentes doses de gesso mineral, além de estudar a resposta do sorgo sacarino (IPA 467-4-2), avaliada por sua produtividade, características agrotecnológicas e extração de nutrientes.



## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Acidez de Solos tropicais

O Brasil é um país de dimensões continentais, sendo que 90% do seu território se encontra entre os trópicos de capricórnio e câncer, ou seja, sua maior parte está situada em região intertropical. Decorrente disto, grande parte do Brasil apresenta clima tropical, que possui como característica elevada precipitação pluviométrica, de modo geral, superior a evapotranspiração e, temperaturas acima de 18 °C, durante a maior parte do ano (IBGE, 2011), condição que predispõe à acidificação dos solos.

A elevada umidade que o solo está submetido favorece o intemperismo químico do material de origem, principalmente pelo processo de hidrólise. Esse processo é desencadeado pela reação entre o mineral e íons  $H^+$  e  $OH^-$ , resultantes da dissociação da água, ocasionando a quebra das ligações entre o oxigênio (O) e os cátions metálicos (Al, Mn, Fe, Ca, Mg, entre outros). Em pH ácido (< 5,0), ocorre uma reação de protonação dos sítios que possuem o cátion Al, fato que ocasiona a desestabilização das ligações Al-O nos octaedros dos filossilicatos e dos grupos funcionais aluminol, ocorrendo sua liberação (Veloso *et al.*, 1992; Kämpf *et al.*, 2009).

Os principais efeitos da acidificação do solo consistem nas elevadas concentrações de Al e Mn, em que nos solos brasileiros o principal agente de acidificação é o Al, acompanhado pela baixa concentração de cátions básicos como K, Ca e Mg (Sousa *et al.*, 2007). É importante destacar que a matéria orgânica é também um componente da acidez do solo, que neste caso se define como acidez potencial, e é devida aos grupos funcionais carboxílicos, fenólicos e alcoólicos (Silva *et al.*, 2004).

Além da perda por lixiviação, os cátions básicos podem ser removidos dos solos em grandes quantidades pelas culturas (Sousa *et al.*, 2007). O resultado deste processo de perda de bases é a maior concentração de cátions ácidos (H e Al) no complexo sortivo e na solução do solo, o que favorece a diminuição do pH, tornando o solo mais ácido (Sousa *et al.*, 2007), fato que afeta diretamente o desenvolvimento do sistema radicular e,

consequentemente, diminui o rendimento das culturas (Rout *et al.*, 2001; Sousa *et al.*, 2007).

## 2.2. Efeitos do Alumínio nas Plantas

O principal efeito de elevados teores de Al no solo ocorre na modificação da morfologia e fisiologia do sistema radicular das plantas. Estas modificações geralmente se apresentam como redução do crescimento e engrossamento radicular, diminuição das ramificações das raízes, o que prejudica a absorção de nutrientes e água (Comin *et al.*, 1999; Sousa *et al.*, 2007).

As interferências do Al nas células estão ligadas a divisão dos ápices das raízes e raízes laterais, ao proporcionarem maior rigidez das paredes celulares pela formação de ligações cruzadas com a pectina; redução da replicação do DNA pela elevação da rigidez das duplas hélices; decréscimo na respiração das raízes; interferência em enzimas responsáveis pela deposição de polissacarídeos na parede celular e enzimas responsáveis pela fosforilação de açúcares, e na diminuição da absorção de vários nutrientes, tais como Ca, Mg, K, P e Fe e, no solo, promove a fixação de P em formas menos disponíveis e diminuição do seu transporte para as raízes (Rout *et al.*, 2001).

Os sintomas de toxidez por Al não são fáceis de detectar e podem ser facilmente confundidos com a deficiência de P. Em folhas, as principais características da toxidez por Al é representada por folhas verdes escuras e com maturidade retardada, arroxamento do pecíolo, das folhas e das nervuras, amarelecimento e morte do ápice das folhas. A toxidez também pode induzir, em algumas plantas, à deficiência de Ca e Fe. A clorose que ocorre em plantas em ambientes com teores de Al em níveis tóxicos é devido à interferência que o Al causa na absorção de K e Cu. O Al também pode atuar na redução do influxo de nutrientes catiônicos como Ca, NH<sub>4</sub> e K (Rout *et al.*, 2001).

Existem mecanismos diferenciados de tolerância às formas de Al pelas plantas (Comin *et al.*, 1999). Segundo esses mesmos autores, híbridos de

milho apresentaram tolerância diferenciada (tolerante e susceptível) a concentrações e formas de Al. Neste estudo, a cultivar tolerante ao Al só o foi para a forma monomérica, sendo que a forma polimérica do Al proporcionou maior intensidade de toxidez.

Outra forma de resposta e mecanismo contra a toxidez por Al em plantas corresponde à elevação contínua da concentração do Ca livre no citosol ou nas proximidades do sistema radicular (Rout *et al.*, 2001; Álvarez *et al.*, 2011). Desta forma, uma vez que o gesso proporciona maior distribuição de Ca no perfil do solo e possibilita maior absorção deste elemento pelas plantas (Caires *et al.*, 2003; Rocha *et al.*, 2008) este mecanismo pode estar sendo indiretamente reforçado, o que pode aumentar a tolerância ao Al pelas plantas.

O conhecimento da especiação iônica da solução em função da aplicação de gesso é de fundamental importância para compreensão da resposta das plantas em produtividade e sua resistência à toxidez pelo Al, fato que não é observado quando somente é avaliada a produtividade e a lixiviação de cátions trocáveis no perfil do solo (Carvalho e Raij, 1997). Zambrosi *et al.* (2007b) ressaltaram que os trabalhos tradicionais utilizando gesso agrícola pouco explicam as respostas dos elementos no solo e sua influência no comportamento das plantas, quando somente é avaliada a lixiviação de cátions no solo.

### 2.3. Gesso Mineral

O gesso é o mineral mais importante da classe dos sulfatos hidratados, sendo representado, principalmente, pelo gipso ou gipsita, e sua ocorrência é observada em rochas gipsíferas (Rocha, 2007; Zanardo e Marques Júnior, 2009). É oriundo de depósitos sedimentares, podendo ser encontrado em solos de regiões áridas e semi-áridas (Lapido-Loureiro e Nascimento, 2009; Melo *et al.*, 2009).

O gesso, ou o mineral gipsita, é uma rocha sedimentar química denominada de Evaporito devido a sua formação ter sido ocasionada pela evaporação da água e com isso precipitação dos componentes em solução

(Fontes, 2012). Além da formação do gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), evaporitos também formam outros minerais sulfatados de Ca como anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), bassanita ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ), ettringita [ $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ] e thuamasita [ $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6 \cdot 12(\text{H}_2\text{O})$ ] (Herrero *et al.*, 2009).

O gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) também pode ser proveniente da indústria de produção do ácido fosfórico, neste caso o gesso é comumente chamado de fosfogesso (Rentería-Villalobos *et al.*, 2010). O fosfogesso contém diversas impurezas desde metais pesados (Cd, Pb, Cr, Cu, Se e Zn) até elementos radioativos ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{231}\text{Pa}$  e  $^{221}\text{Pb}$ ) (Van Der Heijde *et al.*, 1988; Al-Jundi *et al.*, 2008; Rentería-Villalobos *et al.*, 2010).

Devido a isso existe a preocupação quanto ao uso irrestrito de fosfogesso na agricultura, visto que, os metais tendem a ser cumulativos na cadeia trófica, atingindo seres humanos e outros animais (Van Der Heijde *et al.*, 1988; Rentería-Villalobos *et al.*, 2010). Por exemplo, Enamorado *et al.* (2009) avaliando doses crescentes de fosfogesso no solo, observaram elevação do acúmulo de Cd com o aumento da dose de fosfogesso aplicada em plantas de tomate.

As principais reservas de gesso mineral no Brasil são encontradas nos estados do Maranhão (MA), Piauí (PI), Ceará (CE), Pernambuco (PE), Rio Grande do Norte (RN) e Bahia (BA). Sendo que o estado de Pernambuco é destaque na produção deste mineral (Bezerra, 2010).

O polo gesseiro do Araripe em Pernambuco no ano de 2008 foi responsável pela produção de 5,5 milhões de toneladas, quantidade que representa 95% da produção nacional. Desta quantidade, aproximadamente, 200 mil toneladas foram produzidas para utilização agrícola (SINDUSGESSO, 2011).

Sendo um mineral sulfatado de Ca ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), o gesso consiste numa importante fonte de Ca e  $\text{SO}_4^{2-}$  para o solo e, conseqüentemente, para a nutrição das plantas (Caires *et al.*, 2004; Soratto e Crusciol, 2007; Caires *et al.*, 2011). O Ca, em especial, consiste no nutriente com maior parcela de resposta no incremento de crescimento do sorgo (Santi *et al.*, 2006).

O Ca e o S são elementos essenciais à nutrição das plantas (Dechen e Nachtigall, 2007). O Ca possui papel estrutural como pectato de Ca, principal componente da lamela média, que é constituinte da parede celular, membranas plasmáticas e atua no crescimento celular e possui função antitóxica (White e Broadley, 2003; Dechen e Nachtigall, 2007).

O S é absorvido pelas plantas na forma de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Na planta, o S é absorvido de forma ativa, sendo sua translocação realizada tanto de forma acrópeta como basípeta, ocorrendo fácil redistribuição deste elemento na planta, possui importante papel como constituinte dos aminoácidos essenciais cistina, cisteína e metionina e faz parte de diversas proteínas, da molécula de clorofila, sulfolipídeos, flavonoides entre outros (Silva *et al.*, 2003; Dechen e Nachtigall, 2007; Stipp e Casarin, 2010).

#### 2.4. Mecanismos de correção da acidez subsuperficial

A correção da acidez do solo visando elevação do pH e diminuição ou neutralização do  $\text{Al}^{3+}$  é, usualmente, realizada pelo uso de calcário (Maria *et al.*, 1993; Sousa *et al.*, 2007; Lima Júnior e Lima, 2008). Contudo, o calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) é um sal com menor solubilidade do que o gesso, fato que não predispõe a sua lixiviação e atuação em profundidade nas camadas mais profundas no perfil do solo (Veloso *et al.*, 1992; Caires *et al.*, 2004), necessitando da utilização de máquinas para sua incorporação, a fim de que sua reação de neutralização sobre o  $\text{Al}^{3+}$  ocorra, bem como a elevação do pH. No entanto, a remediação de solos ácidos por meio de manejos com incorporação profunda do calcário eleva os custos de produção (Carvalho e Raij, 1997; Farina *et al.*, 2000) e podem favorecer a erosão e destruição da estrutura do solo (Nishimura *et al.*, 2005; Rosa Junior *et al.*, 2006).

A atuação do gesso na diminuição da toxicidade do Al é exercida por cinco mecanismos: (1) Auto-calagem, ou seja, a grande quantidade de  $\text{SO}_4^{2-}$  fornecida pelo gesso desloca por ação de massas as hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) que se encontram adsorvidas nas cargas positivas dos óxidos e argilominerais, liberando-as para a solução do solo, podendo promover elevação do pH e, o

mais importante, complexação do  $\text{Al}^{3+}$ , formando um precipitado inativo de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ; (2) formação de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  insolúvel. Essa forma química é resultante da grande quantidade de Ca fornecida pelo gesso, que desloca para a solução do solo o  $\text{Al}^{3+}$  presente nos sítios de adsorção aniônica dos minerais de argila. Quando em solução o  $\text{Al}^{3+}$  é complexado pelo  $\text{SO}_4^{2-}$  formando o par iônico  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  que é insolúvel; (3) formação de pares iônicos. Nesse caso o  $\text{Al}^{3+}$  em solução reage com o  $\text{SO}_4^{2-}$  formando pares iônicos ( $\text{AlSO}_4^+$ ) que diminuem a atividade do  $\text{Al}^{3+}$  em solução; (4) a elevação da força iônica da solução do solo devido ao grande aporte de  $\text{Ca}^{2+}$  ao sistema, fazendo diminuir a atividade do  $\text{Al}^{3+}$  na solução do solo e, assim, a sua capacidade de ocasionar toxicidade e (5) a adsorção preferencial que o  $\text{SO}_4^{2-}$  possui com o  $\text{Al}^{3+}$  em comparação com o  $\text{Ca}^{2+}$ , tornando o  $\text{Al}^{3+}$  menos disponível para as plantas (Dias, 1992; Carvalho e Raij, 1997; Farina *et al.*, 2000).

Contrariamente ao calcário, o gesso mineral ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) possui maior solubilidade de  $2,41 \text{ g L}^{-1}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  segundo Ribeiro *et al.* (2009) e pode ser lixiviado no perfil do solo com facilidade (Veloso *et al.*, 1992; Caires *et al.*, 2004). Este fato é devido ao ânion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) que é estável no solo diferentemente do ânion carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) presente no calcário ( $\text{CaCO}_3$ ), que quando dissociado na solução do solo reage rapidamente com íons  $\text{H}^+$  formando ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) sendo, posteriormente, dissociado em  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  (Zambrosi *et al.*, 2007a). Estes fatores tornam o gesso preferível quando se visa redistribuir Ca e complexar o  $\text{Al}^{3+}$  em espécies iônicas menos reativas e danosas para as plantas (Carvalho e Raij, 1997; Caires *et al.*, 1998; Sun *et al.*, 2000; Rout *et al.*, 2001; Soratto e Crusciol, 2007).

Vários estudos apresentaram dados favoráveis à aplicação de gesso para fins de diminuição da atividade do íon  $\text{Al}^{3+}$  pela formação de pares iônicos com o íon  $\text{SO}_4^{2-}$  (Carvalho e Raij, 1997; Rout *et al.*, 2001; Zambrosi *et al.*, 2007b) e melhoria na distribuição de Ca em profundidade no perfil do solo (Caires *et al.*, 1998; Caires *et al.*, 2003). Contudo, alguns autores atribuem ao Ca a razão pela qual ocorre melhor desenvolvimento do sistema radicular e não a complexação do  $\text{Al}^{3+}$  pelo íon  $\text{SO}_4^{2-}$  (Raij *et al.*, 1998; Caires *et al.*, 2001a; Rout *et al.*, 2001).

No entanto, seja pela ação do  $\text{SO}_4^{2-}$  ou aumento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$ , a aplicação de gesso proporciona melhor distribuição e/ou desenvolvimento do sistema radicular das plantas (Caires *et al.*, 2001a; Rocha *et al.*, 2008), absorção de nutrientes (Carvalho e Rajj, 1997; Caires *et al.*, 2001a) e produtividade (Caires *et al.*, 2004). Contudo, este efeito não é generalizadamente apresentado na literatura. Existem dados na literatura que indicam ausência de efeito da aplicação de gesso no desenvolvimento radicular em todo ou em alguns horizontes e tipos de solo (Caires *et al.*, 2001a) e na produtividade (Caires *et al.*, 1998; Rajj *et al.*, 1998; Caires *et al.*, 2001a; Caires *et al.*, 2003).

#### 2.5. Ação do gesso nas características químicas e físicas do solo e na extração de nutrientes e produtividade agrícola

Os trabalhos desenvolvidos até o momento não apresentam uma conclusão quando aos efeitos da aplicação do gesso nas propriedades do solo e na produtividade das plantas, uma vez que tais efeitos apresentam-se divergentes dentre os diferentes cenários avaliados. Nesse sentido, investigações sobre esse tema devem ser desenvolvidas de forma a possibilitar o conhecimento da reação do gesso sobre as características específicas do solo e plantas de cada região.

Faria *et al.* (2003) não observaram efeito da aplicação de gesso para melhoria do subsolo e produtividade das culturas do tomate e melão. Esta constatação também foi descrita por outros autores (Caires *et al.*, 1998; Caires *et al.*, 2003) no sistema de plantio direto na cultura da soja. No entanto, para milho, a gessagem associada ou não à calagem proporcionou maior produtividade do que o tratamento controle (Caires *et al.*, 2004; 2011). Este fato também foi evidenciado por Van Rajj *et al.* (1998), avaliando a aplicação de gesso em cultivares de milho sensível à toxidez por Al; Caires *et al.* (2001a) em experimento avaliando a aplicação de gesso associado à calagem em cevada; Carvalho e Rajj (1997) avaliando a produção de matéria seca de plantas de milho; e Zambrosi *et al.* (2007b) avaliando a produtividade de soja.

Caires *et al.* (2004) observaram aumento dos teores de N, K e Ca em tecido foliar de milho em tratamentos utilizando gesso. A maior absorção de nutrientes como N, K, Ca, S e P também foi evidenciada por Caires *et al.* (2001a) em experimento avaliando a aplicação de gesso associado à calagem em cevada. Carvalho e Raij (1997) observaram maior absorção de água, N e K em plantas de milho após a utilização de gesso, fosfogesso e calcário como condicionadores, em experimento em casa de vegetação, sendo que todos os tratamentos foram semelhantemente eficientes na melhoria do subsolo e promoção da absorção de N e K. Contrariamente, Caires *et al.* (2001b) não observaram aumento da absorção dos nutrientes N, P, K e Mg na cultura da soja em sistema de plantio direto após aplicação de gesso, que somente elevou o teor de Ca no tecido foliar, fato previamente esperado pela grande concentração de Ca no gesso. Além disso, Soratto e Crusciol (2007) também observaram diminuição na concentração do Mg solúvel na parte aérea das culturas do arroz, feijão e aveia-preta em experimento com aplicação de gesso.

Caires *et al.* (2001a) afirmaram que a maior produtividade do milho proporcionada pela aplicação dos condicionadores (gesso e calcário) ao solo foi devida à elevação dos teores de Ca no subsolo e não ao favorecimento do crescimento do sistema radicular do milho, o qual foi semelhante ao tratamento controle, não influenciando assim a absorção dos demais nutrientes, exceto o Ca.

Van Raij *et al.* (1998) observaram que o gesso não promoveu efeito sobre a acidez subsuperficial. Em avaliação sobre a aplicação de gesso e fosfogesso em Latossolos ácidos e álicos, Carvalho e Raij (1997) observaram efeito positivo da redução da acidez em subsuperfície, no entanto, em proporção inferior a observada com a utilização de calcário.

Um efeito marcante da aplicação de gesso nas características químicas do solo é a elevação dos teores de Ca em todo o perfil (Caires *et al.*, 1998; 2003), fato que favorece o desenvolvimento radicular, visto este órgão ser exigente nesse nutriente. Contudo, efeitos negativos como a lixiviação de Mg no perfil do solo devido à formação de par iônico neutro com o  $\text{SO}_4^{2-}$ , consistem em um grave problema da aplicação de gesso (Van Raij *et al.*, 1998; Caires *et al.*, 2001a; Feldhake *et al.*, 2001; Soratto e Crusciol, 2007; Zambrosi *et al.*,



2007b). Contudo, esta característica também pode ser positivamente utilizada na recuperação de solos com elevados teores de  $Mg^{2+}$ , quando este elemento está ocasionando desbalanço de cátions no solo (Vyshpolsky *et al.*, 2008).

Comumente, a aplicação de gesso agrícola é consorciada com a aplicação de calcário. Além disso, Soratto e Crusciol (2008) sugerem a utilização do gesso de forma complementar ao calcário, mesmo relatando em seu trabalho que o efeito da aplicação isolada de gesso na redução da atividade do Al e na maior distribuição de Ca, em todas as profundidades avaliadas, foi mais eficaz como condicionador.

Um fato pouco documentado corresponde ao efeito da aplicação de gesso nas características físicas do solo. A aplicação de doses de gesso pode diminuir a cimentação de camadas adensadas do solo devido ao seu efeito floculante das argilas dispersas, porque o  $Ca^{2+}$  fornecido pelo gesso atua como ponte entre as superfícies eletricamente negativas das partículas do solo, paralelamente, a aplicação de gesso não eleva o pH do solo e, assim, não amplia a quantidade de cargas negativas que poderiam aumentar a repulsão e favorecer a dispersão das argilas. Isso interfere no aumento do grau de floculação, diminui o escoamento superficial e, em especial, evita a quebra de agregados (Roth e Pavan, 1991; Lebron *et al.*, 2002; Rosa Junior *et al.*, 2006; Kumar e Saha, 2011).

Agregados correspondem a conglomerados de duas ou mais partículas primárias do solo das frações areia, silte e argila, que estão ligados entre si com maior força do que as partículas ao seu redor, devido às ligações entre cátions di ou trivalentes, compostos orgânicos, sílica entre outros (Kemper e Chepil, 1965; Bronick e Lal, 2005). A estabilidade de agregados do solo é considerada um atributo relacionado com a qualidade do solo a qual determina a infiltração e redistribuição de água, gás e nutrientes para as plantas e a susceptibilidade do mesmo à erosão (Deviren Saygın *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2013). O impacto das gotas de chuva e da água de irrigação são os principais meios de quebra dos agregados (Kumar e Saha, 2011).

No entanto, a aplicação de doses de gesso em solos de carga variável também pode predispor-lo à erosão. Nishimura *et al.* (2005) avaliaram o tempo de início de escoamento superficial em solo de elevada carga variável tratado

com gesso e poliacrilamida e observaram que o tratamento com gesso diminuiu o tempo de início do escoamento superficial. Os autores explicaram que solos altamente intemperizados são ricos em  $\text{Al}^{3+}$ , que é por efeito de carga um forte agente floculante. A troca do  $\text{Al}^{3+}$  pelo  $\text{Ca}^{2+}$  diminui o estado de agregação das partículas e com isso favorece a erosão.

A utilização de gesso na melhoria das características físicas e químicas do solo é geralmente observada em solos salino-sódicos e sódicos, em que o gesso ao fornecer elevadas quantidades de  $\text{Ca}^{2+}$  substitui o  $\text{Na}^+$  dos sítios de adsorção, melhorando características como PST, RAS e capacidade de infiltração de água no solo (Barros *et al.*, 2005; Leite *et al.*, 2007; Makoi e Verplancke, 2010; Voropaeva *et al.*, 2011).

## 2.6. O Sorgo Sacarino (*Sorghum bicolor moench.*)

O sorgo (*Sorghum bicolor moench.*) é uma espécie vegetal da família das gramíneas (C4), assim denominadas devido a seu primeiro produto estável no processo de fotossíntese ser um açúcar de quatro carbonos (malato ou aspartato) como são o milho e a cana-de-açúcar. O sorgo é originário da África (Teixeira *et al.*, 1999; Taiz e Zeiger, 2004; Gnansounou *et al.*, 2005; Almodares e Hadi, 2009; Souza, 2011; Teetor *et al.*, 2011).

Existem diversas espécies de sorgo, sendo que as espécies sacarina (produção de etanol), forrageira (elevada produção de biomassa para fins de silagem) e granífera (produção de grãos para alimentação animal) são as mais utilizadas agronomicamente (May *et al.*, 2011; Souza, 2011). O sorgo sacarino corresponde às espécies vegetais de sorgo que possuem teores superiores a 8 °brix, elevada produção de massa verde e de açúcares fermentáveis em seu caldo, ou seja, açúcar total recuperável (ATR) mínimo de  $80 \text{ Kg t}^{-1}$  (May *et al.*, 2011; Souza, 2011).

Os principais açúcares fermentáveis encontrados no caldo do sorgo sacarino são frutose e glicose (monossacarídeos), maltose e sucrose (dissacarídeo) e rafinose (trissacarídeo) (Gnansounou *et al.*, 2005; Almodares e Hadi, 2009; Vasilakoglou *et al.*, 2011).

O sorgo sacarino pode ser produzido para diversos fins agropecuários ou industriais como produção de massa verde para silagem, produção de etanol e produção de papel (Ximenes *et al.*, 1988; Gnansounou *et al.*, 2005; Podkówka e Podkówka, 2011; Vasilakoglou *et al.*, 2011).

Em relação às culturas do milho e da cana-de-açúcar, o sorgo possui menor expressão econômica, sendo cultivado em áreas bem menores do que as do milho e da cana-de-açúcar e com isso alcançando menores resultados de produção. Os baixos resultados de produtividade do sorgo (grão) são devido ao seu sistema de plantio, ou seja, o sorgo é uma cultura de segunda safra, sendo plantado após as culturas de verão, somando-se a isso os baixos investimentos em adubação e tecnologias agrícolas (IBGE, 2012).

O início das pesquisas com sorgo sacarino remete à década de 70 devido ao incentivo do governo federal em diminuir a dependência de petróleo e ao programa do Proálcool, que procuravam novas matérias primas para a produção de etanol (Ximenes *et al.*, 1988).

A grande vantagem da utilização do sorgo sacarino como matéria prima para produção de etanol se deve ao sistema de cultivo e tratos culturais, que podem ser facilmente adaptados aos existentes na cultura do milho e da cana-de-açúcar (Souza, 2011; Zegada-Lizarazu e Monti, 2012).

Além da possibilidade de utilização de maquinário de preparo do solo e de cultivo de outras espécies gramíneas como o da cana-de-açúcar (Ximenes *et al.*, 1988), o sorgo sacarino apresenta vantagens fisiológicas como maior resistência ao estresse hídrico, elevada capacidade fotossintética, capacidade de ser produzido em solos de baixa fertilidade e solos marginais (Coelho *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2009; Goshadrou *et al.*, 2011; Teetor *et al.*, 2011).

A produtividade de álcool por hectare quando o sorgo é utilizado como matéria prima pode ser igual ou até mesmo superior à produtividade de álcool gerada a partir da cana-de-açúcar (~ 8.000 L ha<sup>-1</sup>) e é superior a produtividade alcançada quando se utiliza como matéria prima o milho (Guigou *et al.*, 2011).

Mesmo com sua elevada rusticidade a condições adversas de clima e solo (Zegada-Lizarazu e Monti, 2012), o sorgo, de forma geral, é uma cultura sensível a elevados teores de Al (Zaifnejad *et al.*, 1997) e seu potencial

produtivo só é alcançado em condições adequadas de fertilidade e disponibilidade hídrica (Coelho, 2011). Sendo os nutrientes Ca, N, Mg e K os mais exigidos por esta cultura (Santi *et al.*, 2006; Coelho, 2011).

## 2.7. Utilização de sorgo sacarino para a produção de biocombustíveis

As pressões sociais e econômicas sobre os combustíveis fósseis motivou a busca por fontes renováveis de energia por serem menos danosas ao ambiente (Guigou *et al.*, 2011; Nogueira, 2011). Segundo Ragauskas *et al.* (2006) a mudança da sociedade atual para uma sociedade industrial sustentável só será mediada quando houver a substituição das fontes energéticas fósseis para as fontes renováveis.

A energia produzida por meio da agricultura corresponde às fontes de biomassa, ou seja, material animal ou vegetal produzido para conversão em combustíveis, que podem ser líquidos, gasosos ou sólidos, e são genericamente denominados de biocombustíveis (Ragauskas *et al.*, 2006; Demirbas, 2008).

Os biocombustíveis são fontes renováveis de energia provenientes de transformações químicas e/ou biológicas de matéria prima orgânica (biomassa), seja essa de origem vegetal ou animal (Demirbas, 2008). As principais culturas vegetais para a produção de biocombustíveis no Brasil são cana-de-açúcar, que é utilizada para a produção de etanol (Gnansounou *et al.*, 2005; Ragauskas *et al.*, 2006) e mamona, soja e pinhão manso para a produção de biodiesel (Nogueira, 2011).

Além de ser uma fonte renovável de energia (Ragauskas *et al.*, 2006; Chohnan *et al.*, 2011), os biocombustíveis apresentam vantagens socioeconômicas e ambientais em relação à utilização dos combustíveis derivados do petróleo, pois, possuem menor potencial poluidor ao ambiente, atuam na redução dos gases do efeito estufa e, em vários países, inclusive no Brasil, são promovidos como instrumento de mudança social e econômica nas sociedades rurais (Demirbas, 2008; Da Silva César e Otávio Batalha, 2010; Nogueira, 2011; Visser *et al.*, 2011; Lavanya *et al.*, 2012).

Além da cana-de-açúcar outras culturas podem ser utilizadas para a produção de etanol, em especial, o sorgo sacarino (Souza, 2011; Vasilakoglou *et al.*, 2011; Zegada-Lizarazu e Monti, 2012). A cultura do sorgo não é desconhecida da pesquisa Brasileira. O sorgo foi investigado no extinto Proálcool, na década de 70, como alternativa para a produção de etanol, sendo as pesquisas posteriormente voltadas à utilização do sorgo sacarino para alimentação animal buscando-se aptidão forrageira (Ximenes *et al.*, 1988; Souza, 2011).

O sorgo é tido como uma alternativa à produção de biocombustíveis devido a sua rusticidade a condições adversas de solo e clima (Ximenes *et al.*, 1988; Guigou *et al.*, 2011; Zegada-Lizarazu e Monti, 2012), a qualidade do sulco de seu colmo, o qual é rico em açúcares fermentáveis (Chohnan *et al.*, 2011; Guigou *et al.*, 2011; Vasilakoglou *et al.*, 2011), a sua elevada eficiência fotossintética (Curt *et al.*, 1998; Almodares e Hadi, 2009) e menor exigência nutricional e hídrica do que outras culturas, como o milho (Almodares e Hadi, 2009; Zegada-Lizarazu e Monti, 2012).

Diversos autores relataram a eficiência de produção de etanol a partir do sorgo (Zhao *et al.*, 2009; Guigou *et al.*, 2011). Segundo Gnansounou *et al.* (2005) a produtividade de álcool por hectare, utilizando-se como matéria prima o colmo é, aproximadamente, de 3.500 L. Já Guigou *et al.* (2011) comenta que a produtividade de álcool utilizando o sorgo sacarino pode alcançar 8.000 L ha<sup>-1</sup>, valores semelhantes ou até mesmo superiores aos da cana-de-açúcar e superiores aos obtidos com o milho.

Contudo, existem relatos que negam a eficácia da utilização do sorgo como matéria prima para a produção de etanol (Linton *et al.*, 2011). A produção de etanol utilizando o sorgo é dependente, principalmente, da cultivar utilizada, do custo de produção, época de plantio e processo fermentativo a ser utilizado (Chohnan *et al.*, 2011; Guigou *et al.*, 2011; Linton *et al.*, 2011; Teetor *et al.*, 2011).

Em relação à produtividade do sorgo o potencial genético ainda proporciona grandes diferenças nas variedades comerciais. Guigou *et al.* (2011) avaliando três variedades de sorgo (MS1, Topper e Theis) observaram produtividade de álcool de 25, 38 e 40 L t<sup>-1</sup> de planta, respectivamente. Além

disso, o sorgo possui maior custo de produção e menor retorno financeiro por hectare em relação a outras culturas utilizadas para produção de etanol como o milho, a cana-de-açúcar, o algodão e a soja (Linton *et al.*, 2011).

Não obstante, a utilização do sorgo sacarino para a produção de biocombustíveis é benéfica socioeconomicamente, pois, esta matéria prima não consiste em uma cultura de interesse alimentar como o é a soja, o milho e a cana-de-açúcar que, se utilizados em grande escala, poderão proporcionar o surgimento de questões de insegurança alimentar, ou seja, de distribuição de alimentos em quantidade e qualidade insuficientes (Silva, 2010; Sorda *et al.*, 2010).

### 3. Material e Métodos

Este experimento foi composto pela avaliação dos efeitos das doses de gesso e de seu tempo de contato no solo o qual foi realizado entre os meses de janeiro a abril de 2012 e dos efeitos do gesso nas características produtivas do sorgo sacarino o qual compreendeu os meses de agosto a novembro de 2012.

#### 3.1. Caracterização do ambiente e do solo

O experimento foi instalado em campo na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), pertencente à Universidade Federal Rural de Pernambuco, localizada no Município de Carpina, Pernambuco. A EECAC localiza-se nas coordenadas geográficas 7°51'04" de Latitude Sul e 35°14'27" de Longitude Oeste, a 178 m, em clima do tipo "AS" tropical chuvoso com verão seco, de acordo com a classificação de Köppen. O solo em que o experimento foi instalado foi classificado como ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso A proeminente sendo constituído pelos horizontes Ap (0-19 cm), A2 (19-53 cm), A3 (53-101 cm), AB (101-130 cm) e Btx (130-200 cm) (Alves, 1994).

Após a marcação das parcelas no campo onde se realizou o ensaio experimental, retirou-se uma amostra simples de cada parcela nas profundidades 0,0-0,2; 0,2-0,4; e 0,4-0,6 m para determinação das características químicas e físicas do solo (Tabela 1), antes da aplicação dos tratamentos.

O ensaio se iniciou com o preparo do solo de forma convencional empregando-se gradagem e controle de plantas indesejáveis antes da aplicação dos tratamentos na área utilizada para o experimento.

Foram aplicadas lâminas de irrigação durante os 90 dias de permanência do gesso no campo. Nesse período e durante todo o ensaio de

campo mensurou-se a quantidade de água aplicada por irrigação, o volume e a distribuição da precipitação pluviométrica na área (Figura 1).

Nas três camadas em avaliação (0,0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m) foram coletadas a fração argila (Embrapa, 1997). Os materiais foram avaliados qualitativamente quanto aos seus constituintes por meio de difratometria de raios-X. Observou-se mineralogia da fração argila composta por Caulinita 7,23 Å (1); Goethita 4,18 Å (2); Caulinita 3,59 Å (3) e Quartzo 3,35 Å (4).

Tabela 1. Atributos químicos e físicos do solo da área experimental em diferentes profundidades antes da aplicação dos tratamentos

Atributo	Profundidade (m)		
	0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6
pH água	5,39	5,30	5,17
pH CaCl <sub>2</sub>	3,83	3,79	3,71
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,36	0,26	0,17
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,30	0,27	0,22
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,06	0,03	0,01
Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,02	0,01	0,01
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,19	0,28	0,36
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg dm <sup>-3</sup> )	5,46	6,6	6,99
P (mg dm <sup>-3</sup> )	52,26	---	---
m (%)	28,02	43,40	57,98
C-org (dag Kg <sup>-1</sup> )	1,12	1,15	0,98
Macrop (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,17	0,11	0,10
Microp (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,29	0,20	0,23
Ds	1,61	1,80	1,79
Al total (g Kg <sup>-1</sup> )	24,71	23,37	28,05
Areia (g Kg <sup>-1</sup> )	776,4	760,4	728,4
Silte (g Kg <sup>-1</sup> )	52,1	36,2	37,3
Argila (g Kg <sup>-1</sup> )	171,4	203,3	234,2
Classe textural	Franco-argilo-arenosa	Franco-argilo-arenosa	Franco-argilo-arenosa



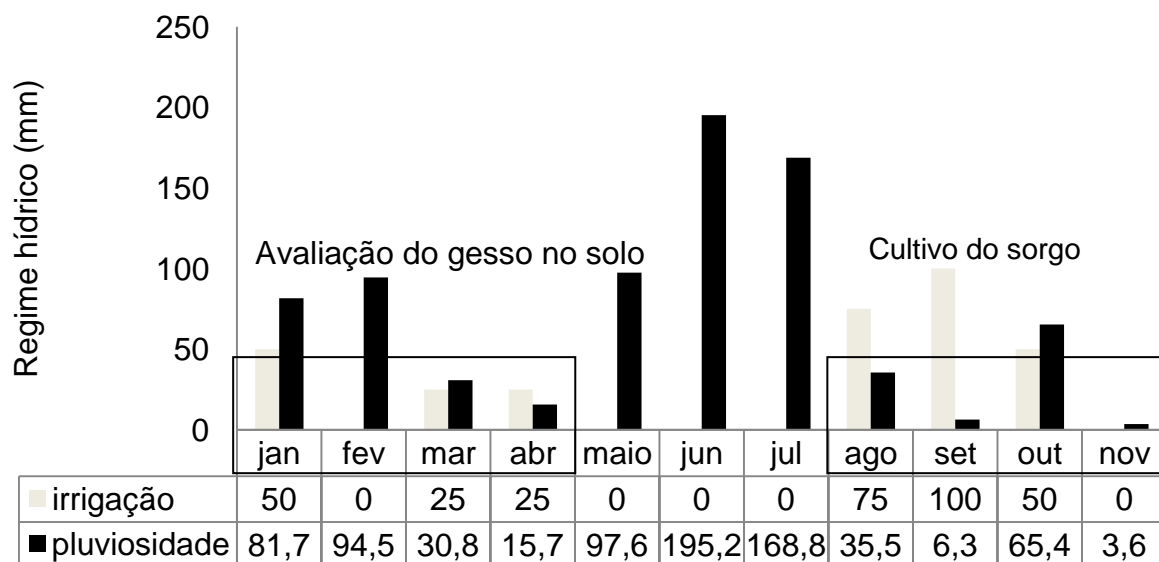


Figura 1. Distribuição da precipitação pluviométrica e quantidade de água aplicada por irrigação durante o período do ensaio de campo.

### 3.2. Definição e aplicação dos tratamentos

O experimento foi instalado no campo em delineamento de blocos ao acaso, composto por 5 tratamentos (0; 2; 4; 6; e 8 t ha<sup>-1</sup> de gesso) e 4 repetições (blocos), totalizando 20 unidades experimentais (parcelas). As parcelas tiveram dimensões de 6,4 x 12 m, com 76,8 m<sup>2</sup> de área total, de forma a compreender 8 linhas de cultivo com 12 m de comprimento cada, espaçadas em 0,8 m entre si. A parcela útil correspondeu a 32 m<sup>2</sup> (3,2 x 10 m), sendo eliminados 1,0 m de bordadura no comprimento da parcela útil e duas linhas de cultivo nas extremidades da parcela, formando-se a parcela útil com 4 linhas de cultivo. A aplicação das doses de gesso foi efetuada a lanço em superfície sem incorporação (Figura 3), permanecendo nessa condição 8 meses antes dos procedimentos necessários para o plantio do sorgo sacarino. As quantidades de gesso aplicadas uniformemente em cada parcela foram 14, 4; 28, 8; 43, 2; e 57,6 kg correspondendo as doses de gesso de 2, 4, 6 e 8 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente.



Figura 2. Distribuição a lanço e na superfície do gesso mineral nas parcelas do ensaio de acordo com os tratamentos.

### 3.3. Avaliação das variáveis químicas do solo

Foram realizadas amostragens do solo nas profundidades de 0,0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m em quatro épocas: antes da aplicação dos tratamentos (tempo zero), 15, 64 e 90 dias após a aplicação das doses de gesso ao solo.

Cada amostra simples foi coletada ao acaso dentro da área útil de cada parcela, nas três profundidades estudadas. Acondicionadas em sacos plásticos, secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm de malha para obtenção da TFSA.

Foram avaliados os teores trocáveis de  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  extraídos com  $\text{KCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ , sendo  $\text{Al}^{3+}$  dosado por titulometria e  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  por espectrofotometria de absorção atômica; o  $\text{K}^{+}$  foi extraído com Mehlich-1 e determinado por fotometria de chama. Realizou-se a leitura do pH em solução de cloreto de Ca a  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  ( $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ) e em água (Embrapa, 2009).

### 3.4. Avaliação das variáveis físicas do solo

Aproximadamente 5 meses após a aplicação das doses de gesso (tratamentos) foram realizadas coletas de amostras de solo indeformadas com cilindro volumétrico na camada superficial (0,0-0,2 m) para determinação da macroporosidade pela diferença entre o volume de água no anel saturado e sob 0,6 m de tensão; microporosidade pela diferença entre o conteúdo de água na amostra a 0,6 m e seca em estufa (Embrapa, 1997).

Em amostras deformadas coletadas apenas na camada superficial (0,0-0,2 m) foi determinada a estabilidade de agregados maiores que 5 mm de diâmetro em água, menores do que 0,125 mm e percentagem de agregados estáveis em água nas classes de diâmetro correspondentes a 4,0-2,0; 2,0-1,0; 1,0-0,5; 0,5-0,250 e 0,250-0,125 mm (Embrapa, 1997). Determinou-se também o diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico (Kemper e Chepil, 1965) e o índice de estabilidade de agregados (Castro Filho *et al.*, 1998).

Para calcular o diâmetro médio ponderado (DMP) utilizou-se a seguinte expressão:

$$DMP = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i$$

em que:

$\bar{X}_i$  = corresponde ao diâmetro médio de cada fração, e

$W_i$  = corresponde à proporção entre o peso de agregados em cada uma das classes em relação ao total da amostra.

Para calcular o diâmetro médio geométrico (DMG) utilizou-se a seguinte expressão:

$$DMG = \exp \frac{\sum_{i=1}^n W_i \log \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Em que:

$\bar{X}_i$  = corresponde ao diâmetro médio de cada fração;

$W_i$  = corresponde ao peso dos agregados em cada fração, e

$\sum_{i=1}^n W_i$  = corresponde ao peso total da amostra.

Para calcular o índice de estabilidade de agregados (IEA) utilizou-se a seguinte expressão:

$$IEA = \frac{\text{peso da amostra seca} - \text{wp25} - \text{areia}}{\text{peso da amostra seca} - \text{areia}} 100$$

Em que:

Wp25 = corresponde ao peso das amostras com diâmetro de agregados superiores a 0,25 mm.

### 3.5. Avaliação das diferentes formas de Alumínio

Nas amostras coletadas nas três profundidades dos tratamentos que receberam as doses de gesso de 0; 4; e 8 t ha<sup>-1</sup> aos 0 e 15 dias após a aplicação das doses de gesso, determinou-se diferentes formas de Al.

Para a determinação das diferentes formas de Al realizou-se a dissolução seletiva do Al em cada camada de solo, extraíndo-se Al cristalino, compostos de Al amorfos extraíveis, Al de ligações orgânicas e Al total. Para isso utilizou-se solução de citrato-ditionito-bicarbonato (Mehra e Jackson, 1960; Holmgren, 1967), solução de oxalato ácido de amônio (Schwertmann, 1964; Mckeague e Day, 1966), solução de pirofosfato e ataque sulfúrico (Embrapa, 1997), respectivamente. O Al total foi determinado por titulometria e os demais por espectrofotometria de absorção atômica.

Técnicas de dissolução seletiva quantificam até certo ponto a quantidade de Al que se encontra de forma amorfa (oxalato ácido de amônio - OAA), cristalino (ditionito citrato bicarbonato - DCB) e ligado a matéria orgânica do

solo (pirofosfato de sódio - PIROFOSFATO) (Coelho *et al.*, 2010; Álvarez *et al.*, 2012).

O citrato-ditionito-bicarbonato extrai grande parte da fração cristalina de Fe no solo, mas também de óxidos de Fe amorfos, aluminossilicatos não cristalinos e gibsita (Mckeague e Day, 1966; García-Rodeja *et al.*, 2004; Coelho *et al.*, 2010).

O oxalato dissolve muitas frações de óxidos de Fe e Al amorfos e poucas de óxidos cristalinos, pequena fração de Al na gibsita e de hidróxidos de Al entre camadas (Mckeague e Day, 1966; Coelho *et al.*, 2010).

O pirofosfato de Na é considerado como um bom extrator das formas de Al e Fe ligados à matéria orgânica. Contudo, o pirofosfato de Na pode superestimar a quantidade de Al, devido à dissolução alcalina da gibsita e a peptização de hidróxidos de Al ligados à matéria orgânica e a dissolução de imogolita e alofana (García-Rodeja *et al.*, 2004; Coelho *et al.*, 2010; Coelho *et al.*, 2011).

Esses extratores fornecem apenas uma estimativa da quantidade de Al nessas frações. Contudo, neste experimento consideraremos que os extratores citrato-ditionito-bicarbonato, oxalato ácido de amônio e pirofosfato sódico representam os reservatórios de Al cristalino, amorfo e ligado à matéria orgânica, respectivamente.

### 3.6. Plantio do sorgo sacarino

Após 8 meses da aplicação do gesso ao solo, foi realizado o plantio de sorgo sacarino, utilizando-se a variedade IPA 467-4-2. O sorgo foi plantado em linhas espaçadas de 0,8 m e com 12 m de comprimento. Foram semeadas 25 sementes por m linear e realizado desbaste das plantas duas semanas após sua emergência, a fim de obter stand de 12 plantas por m linear. Um mês antes do plantio do sorgo procedeu-se a calagem e incorporação do calcário de forma manual utilizando-se enxada, aproximada de 15 cm no solo, utilizando-se 23,56 Kg de calcário dolomítico (CaO= 49%; MgO= 20% e PRNT = 80,77%)

por parcela, o que correspondeu a, aproximadamente, 3,3 t ha<sup>-1</sup>, quantidade esta necessária para elevação da saturação por bases para 60% (Oliveira *et al.*, 2007). Aplicaram-se os nutrientes (NPK) conforme o Manual de Recomendação de Corretivos e Fertilizantes para o Estado de Pernambuco (IPA, 2008) para a cultura do sorgo sacarino de acordo com análise prévia da fertilidade do solo (Tabela 2).

Tabela 2. Resultado da análise química do solo até 0,2 m de profundidade, para fins de recomendação de calagem e adubação antes do plantio de sorgo sacarino nas parcelas controle

pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m
	mg dm <sup>-3</sup>										%	
						cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>						
5,33	46,11	0,05	0,06	0,61	0,23	0,19	3,50	0,95	1,14	4,45	13	11

As quantidades de nutrientes aplicadas foram 30, 20 e 30 Kg ha<sup>-1</sup> de NPK nas formas de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O em semeadura e 60 Kg ha<sup>-1</sup> de N em cobertura utilizando como fontes ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio para os nutrientes NPK, respectivamente. As adubações tanto em semeadura quanto em cobertura foram realizadas manualmente. No decorrer dos 3 meses de condução da cultura foram realizados os tratos culturais (manejo de plantas indesejáveis, controle de pragas e doenças e irrigação, que correspondeu a uma lâmina semanal aproximada de 25 mm exceto quando houve precipitação pluviométrica suficiente na área experimental).

### 3.7. Extração de nutrientes e produtividade agrícola e industrial do sorgo sacarino

Para avaliação da extração de nutrientes pelas plantas e características agroindustriais foram coletadas 24 plantas por parcela, quando se iniciou a emissão das panículas, aos 87 dias após o plantio. Assim, 12 plantas foram utilizadas para a avaliação da extração de nutrientes e 12 enviadas ao laboratório de química industrial da Usina Petribu para análises agroindustriais.

Após a colheita, as plantas destinadas a mensuração da extração de nutrientes foram passadas em máquina de triturar forragem para coleta de uma

amostra de material homogêneo. As amostras foram secas em estufa a 65 °C até atingirem peso constante e, em seguida, moídas em moinho tipo Wiley. Os nutrientes P, K, Ca, Mg e S foram extraídos por digestão nitro-perclórica e N por digestão sulfúrica, sendo o P dosado por colorimetria, o K por fotometria de chama, o Ca e o Mg por espectrofotometria de absorção atômica, o S por turbidimetria e o N por microdestilação pelo método Kjeldahl (Embrapa, 2009).

A produtividade do sorgo foi avaliada pela coleta e pesagem da área útil de cada parcela (32 m<sup>2</sup>), somando-se o peso das 24 plantas utilizadas para análises de nutrientes e características agrotecnológicas, com posterior estipulação para hectare. Para o cálculo da extração de nutrientes (kg ha<sup>-1</sup>), a produtividade do sorgo (kg ha<sup>-1</sup>) de cada tratamento, em massa seca, foi multiplicada pelo teor do nutriente (g kg<sup>-1</sup>) extraído das amostras.

As características agrotecnológicas avaliadas foram: teor de sacarose (POL do caldo em %), fibra industrial no sorgo (Fibra %), pureza do caldo (PZA %), açúcar total recuperável (ATR Kg t<sup>-1</sup>), açúcares redutores totais (ART%), açúcares redutores (AR%) e percentagem de POL do sorgo (PC%).

Para avaliação da produtividade teórica de etanol por hectare utilizou-se a seguinte equação (Vasilakoglou *et al.*, 2011).

$$\text{Etanol (L ha}^{-1}\text{)} = \text{ART}(\%) \times \text{massa verde (Mg ha}^{-1}\text{)} \times 6,5 \times 0,85 \times \left(\frac{1,0}{0,79}\right)$$

Em que:

ATR = Conteúdo total de açúcares em percentagem (%);

6,5 = fator de conversão do etanol a partir do açúcar;

0,85 = eficiência do processo de fermentação;

$\left(\frac{1,0}{0,79}\right)$  = gravidade específica do álcool.

### 3.8. Análises estatísticas

Os dados experimentais foram analisados após verificação da obediência a distribuição normal e homocedasticidade da variância, sendo,

transformado em raiz quadrada quando necessário. Realizou-se a análise de variância para efeito das doses de gesso e tempos de amostragem, bem como sua interação, em cada profundidade individualmente. Quando se observou efeitos significativos, os dados foram analisados por regressão ( $p < 0,05$ ), e como critério de escolha dos modelos foi adotado a significância e magnitude dos coeficientes da regressão. Foi utilizado o programa estatístico SAEG (SAEG,1999).



## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Alteração de atributos químicos do solo pela aplicação de doses crescentes de gesso mineral e tempo de contato no solo

A aplicação de gesso mineral e seu tempo de contato no solo promoveram alteração nas características químicas do solo nas três profundidades avaliadas (Tabelas 2, 3 e 4). A maior ação da aplicação de gesso nas propriedades químicas foi observada na camada inicial (0-0,2 m), quando se considera os teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e saturação (m), sendo observado decréscimo de sua influência nas profundidades subsequentes (0,2-0,4 e 0,4-0,6 m). Contrariamente a esse comportamento, os teores de  $\text{SO}_4^{2-}$  foram influenciados pela aplicação de gesso nas três profundidades estudadas (Tabela 3), assim como o pH (Tabela 4). Para o tratamento tempo de contato do gesso com o solo as variáveis  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e m foram influenciadas nas três profundidades estudadas, assim como os teores de  $\text{SO}_4^{2-}$  (Tabelas 2 e 3) e o pH (Tabela 4). As características químicas avaliadas que foram significativas pela análise de variância (Tabelas 2, 3 e 4) foram submetidas à análise de regressão, sendo utilizado como critério de escolha o modelo com maior significância de seus parâmetros, seguida da magnitude do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

O tempo de contato do gesso com o solo influenciou mais as características químicas do solo, do que as diferentes doses de gesso aplicadas, porque elevou significativamente os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  (Tabela 2) e reduziu m (Tabela 3) em subsuperfície. Esse é o efeito mais desejável quando se aplica gesso ao solo. É necessário, no entanto, e os resultados alertam para isso, é que não haja lixiviação de  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  para camadas mais profundas do solo.

Pode-se averiguar, portanto, que é mais importante no manejo do gesso, aplicá-lo em superfície com antecedência, do que utilizar doses elevadas imediatamente antes do plantio. Mesmo sendo mais solúvel do que o calcário, o gesso mineral precisa de tempo para reagir no solo, como demonstram os resultados encontrados.

Os teores de  $\text{SO}_4^{2-}$  cresceram tanto com a elevação das doses de gesso aplicadas, como com o tempo de contato dele com o solo e sua interação, principalmente nas camadas mais superficiais (Tabela 3). Isso demonstra que o gesso é uma fonte de S, importante nutriente no cultivo de gramíneas. Adicionalmente, como ânion sua movimentação no solo é maior do que os cátions, como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ .

O gesso reduziu o pH do solo, tanto em superfície, como em subsuperfície, independente da dose aplicada ou do tempo de contato dele com o solo (Tabela 4).

A capacidade de modificação das características químicas do solo pelo uso de gesso mineral está ligada à elevação da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  nos sítios de adsorção catiônicos e aniônicos, respectivamente (Fahrenhorst *et al.*, 1999; Caires *et al.*, 2003) e sua capacidade de mobilização e atuação nas camadas mais profundas do solo, devido a sua solubilidade, que é superior a de outros condicionantes químicos do solo, como o calcário (Caires *et al.*, 1998; Soratto e Crusciol, 2008), causando, assim, modificações no complexo de troca do solo em superfície e subsuperfície.

Tabela 2. Teores trocáveis de cálcio, magnésio e potássio em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral e tempos de contato no solo em três profundidades, análises de variância e coeficiente de variação dos dados

Fator	Ca				Média	Mg				Média	K				Média
	Tempo (dias)					Tempo (dias)					Tempo (dias)				
	0	15	64	90	0	15	64	90	0	15	64	90			
Dose de gesso (t ha <sup>-1</sup> )	cmolc dm <sup>-3</sup>														
Profundidade 0,0 – 0,2 m															
0	0,12	0,30	0,45	0,61	0,37	0,16	0,18	0,24	0,20	0,20	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05
2	0,19	0,45	0,53	0,76	0,49	0,17	0,15	0,17	0,19	0,17	0,05	0,07	0,04	0,03	0,05
4	0,28	0,59	0,86	0,82	0,64	0,21	0,13	0,19	0,07	0,15	0,08	0,06	0,04	0,04	0,05
6	0,33	0,85	1,04	1,13	0,84	0,21	0,13	0,17	0,13	0,16	0,07	0,07	0,06	0,05	0,06
8	0,18	0,77	1,08	1,56	0,89	0,20	0,14	0,11	0,18	0,16	0,05	0,08	0,04	0,04	0,05
Média	0,22	0,59	0,79	0,97		0,19	0,15	0,18	0,15		0,06	0,07	0,05	0,04	
Dose de gesso	F				F				F						
Tempo	15,8*				2,37 <sup>ns</sup>				0,79 <sup>ns</sup>						
Dose de gesso*Tempo	55,32*				2,71 <sup>ns</sup>				6,15*						
	1,49 <sup>ns</sup>				1,82 <sup>ns</sup>				0,67 <sup>ns</sup>						
C.V. (%)	17,63				20,31				21,67						
Profundidade 0,2 – 0,4 m															
Dose de gesso															
0	0,16	0,18	0,53	0,68	0,39	0,15	0,12	0,23	0,17	0,17	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03
2	0,10	0,28	0,40	0,68	0,36	0,15	0,16	0,20	0,16	0,17	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03
4	0,18	0,32	0,44	0,72	0,41	0,20	0,14	0,21	0,13	0,17	0,02	0,05	0,05	0,03	0,04
6	0,20	0,29	0,48	0,84	0,45	0,17	0,16	0,24	0,23	0,20	0,04	0,05	0,06	0,05	0,05
8	0,18	0,34	0,48	0,89	0,47	0,18	0,15	0,14	0,19	0,16	0,02	0,05	0,05	0,04	0,04
Média	0,16	0,28	0,47	0,76		0,17	0,15	0,20	0,17		0,03	0,04	0,04	0,04	
Dose de gesso	F				F				F						
Tempo	2,76*				0,67 <sup>ns</sup>				2,02 <sup>ns</sup>						
Dose de gesso*Tempo	108,37*				1,76 <sup>ns</sup>				3,61*						
	0,83 <sup>ns</sup>				0,8 <sup>ns</sup>				0,49 <sup>ns</sup>						
C.V. (%)	14,36				20,06				29,08						
Profundidade 0,4 – 0,6 m															
Dose de gesso															
0	0,08	0,26	0,43	0,69	0,36	0,13	0,10	0,20	0,11	0,13	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01
2	0,07	0,25	0,35	0,71	0,34	0,13	0,16	0,19	0,18	0,17	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
4	0,16	0,31	0,36	0,68	0,38	0,17	0,14	0,22	0,21	0,18	0,01	0,03	0,03	0,03	0,02
6	0,13	0,28	0,37	0,56	0,34	0,13	0,14	0,19	0,28	0,19	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
8	0,10	0,30	0,39	0,57	0,34	0,13	0,11	0,18	0,24	0,17	0,01	0,02	0,03	0,03	0,02
Média	0,11	0,28	0,38	0,64		0,14	0,13	0,20	0,20		0,01	0,02	0,03	0,02	
Dose de gesso	F				F				F						
Tempo	0,36 <sup>ns</sup>				2,25 <sup>ns</sup>				4,17*						
Dose de gesso*Tempo	53,16*				7,74*				4,97*						
	0,54 <sup>ns</sup>				1,33 <sup>ns</sup>				0,80 <sup>ns</sup>						
C.V. (%)	21,97				18,04				35,76						

\* Significativo a 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo.

Tabela 3. Teores trocáveis de alumínio, saturação por alumínio e teores de sulfato em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral e tempos de contato no solo em três profundidades, análise da variância e coeficiente de variação dos dados

Fator	Al				Média	m				Média	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>				Média
	Tempo (dias)					Tempo (dias)					Tempo (dias)				
	0	15	64	90		0	15	64	90		0	15	64	90	
Dose de gesso (t ha <sup>-1</sup> )	cmolc dm <sup>-3</sup>														
	Profundidade 0,0 – 0,2 m														
0	0,23	0,12	0,19	0,19	0,18	24,54	11,14	12,19	11,60	14,87	5,74	4,08	4,92	6,10	5,21
2	0,23	0,12	0,23	0,25	0,21	21,25	8,54	14,10	12,21	14,02	4,85	48,41	47,64	38,25	34,79
4	0,16	0,06	0,14	0,16	0,13	12,82	4,49	7,83	9,54	8,67	6,55	97,16	76,66	108,21	72,14
6	0,12	0,02	0,13	0,13	0,10	11,43	1,25	6,22	6,06	6,24	5,45	129,47	125,81	118,07	94,70
8	0,21	0,09	0,19	0,16	0,16	20,84	5,24	8,54	5,26	9,97	5,66	146,62	204,15	184,22	135,16
Média	0,19	0,08	0,18	0,18		18,18	6,13	9,77	8,93		5,65	85,15	91,84	90,97	
	F					F					F				
Dose de gesso	7,52*					8,88*					30,22*				
Tempo	9,59*					11,37*					34,09*				
Dose de gesso*Tempo	0,47 <sup>ns</sup>					0,81 <sup>ns</sup>					3,55*				
C.V. (%)	29,72					33,003					33,491				
	Profundidade 0,2 – 0,4 m														
Dose de gesso															
0	0,33	0,15	0,22	0,30	0,25	31,02	19,47	15,16	17,02	20,67	4,92	5,20	5,92	6,43	5,62
2	0,29	0,16	0,34	0,33	0,28	30,31	15,25	21,97	16,98	21,13	5,74	23,58	25,75	23,89	19,74
4	0,26	0,12	0,32	0,31	0,25	23,77	12,92	19,60	15,75	18,01	5,71	33,24	43,40	56,16	34,62
6	0,22	0,13	0,27	0,29	0,23	23,04	12,58	14,96	13,31	15,97	7,91	26,72	52,67	60,17	36,87
8	0,29	0,15	0,30	0,26	0,25	27,19	13,13	18,80	11,66	17,69	6,81	28,81	58,88	75,30	42,45
Média	0,28	0,14	0,29	0,30		27,06	14,67	18,10	14,94		6,22	23,51	37,32	44,39	
	F					F					F				
Dose de gesso	1,00 <sup>ns</sup>					1,84 <sup>ns</sup>					47,65*				
Tempo	23,43*					16,57*					65,37*				
Dose de gesso*Tempo	1,13 <sup>ns</sup>					0,91 <sup>ns</sup>					5,28*				
C.V. (%)	14,84					16,739					18,709				
	Profundidade 0,4 – 0,6 m														
Dose de gesso															
0	0,41	0,19	0,35	0,43	0,34	40,15	20,13	22,77	24,63	26,92	5,71	7,65	6,56	6,06	6,50
2	0,39	0,19	0,43	0,43	0,36	40,49	19,22	27,24	19,26	26,55	4,53	14,74	25,72	29,14	18,53
4	0,33	0,18	0,43	0,39	0,33	31,32	16,47	25,59	21,93	23,83	6,65	23,95	34,05	45,27	27,48
6	0,33	0,16	0,42	0,35	0,32	34,29	16,01	24,48	20,38	23,79	6,25	20,42	38,70	41,76	26,78
8	0,36	0,18	0,36	0,33	0,31	37,10	17,65	22,68	19,05	24,12	7,39	21,97	41,03	50,70	30,27
Média	0,36	0,18	0,40	0,39		36,67	17,90	24,55	21,05		6,10	17,75	29,21	34,59	
	F					F					F				
Dose de gesso	1,43 <sup>ns</sup>					0,66 <sup>ns</sup>					14,30*				
Tempo	54,54*					24,51*					26,53*				
Dose de gesso*Tempo	1,01 <sup>ns</sup>					0,53 <sup>ns</sup>					1,81 <sup>ns</sup>				
C.V. (%)	10,28					14,53					26,601				

\* Significativo a 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo.

Tabela 4. pH em água e cloreto de cálcio em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral e tempos de contato dele no solo em três profundidades, análise da variância e coeficiente de variação dos dados.

Fator	pH água				Média	pH CaCl <sub>2</sub>				Média
	Tempo (dias)					Tempo (dias)				
	0	15	64	90		0	15	64	90	
Dose de gesso (t ha <sup>-1</sup> )										
Profundidade 0,0 – 0,2 m										
0	5,33	5,31	5,36	5,28	5,32	3,70	3,89	4,10	3,92	3,90
2	5,28	4,52	4,46	4,70	4,74	3,69	3,73	4,04	3,81	3,81
4	5,48	4,70	4,94	4,82	4,98	3,98	3,94	4,44	4,08	4,11
6	5,56	4,58	4,62	4,93	4,92	4,03	4,02	4,22	3,99	4,06
8	5,31	4,56	4,22	4,82	4,73	3,74	3,77	4,21	4,02	3,94
Média	5,39	4,73	4,72	4,91		3,83	3,87	4,20	3,96	
			F				F			
Dose de gesso			5,30*				3,59*			
Tempo			10,78*				8,60*			
Dose de gesso*Tempo			1,05 <sup>ns</sup>				0,36 <sup>ns</sup>			
C.V. (%)			43,254				32,002			
Profundidade 0,2 – 0,4 m										
Dose de gesso										
0	5,17	4,71	5,15	5,20	5,06	3,58	3,64	4,25	3,62	3,77
2	5,39	4,44	4,42	4,64	4,72	3,63	3,56	3,92	3,48	3,65
4	5,44	4,78	4,31	4,32	4,71	4,05	3,95	4,04	3,63	3,92
6	5,38	4,57	4,28	4,73	4,74	4,01	3,68	3,95	3,82	3,86
8	5,16	4,35	4,08	4,32	4,48	3,67	3,74	4,01	3,66	3,77
Média	5,30	4,57	4,45	4,64		3,79	3,71	4,04	3,64	
			F				F			
Dose de gesso			5,90*				2,74*			
Tempo			24,00*				9,04*			
Dose de gesso*Tempo			1,99*				1,23 <sup>ns</sup>			
C.V. (%)			3,68				3,3324			
Profundidade 0,4 – 0,6 m										
Dose de gesso										
0	5,04	4,70	4,85	4,68	4,81	3,65	3,48	3,89	3,59	3,65
2	5,18	4,47	4,24	4,32	4,55	3,64	3,65	3,84	3,42	3,64
4	5,36	4,57	4,31	4,57	4,70	3,82	3,74	3,91	3,67	3,79
6	5,26	4,66	4,20	4,54	4,66	3,75	3,75	3,68	3,80	3,74
8	5,02	4,47	4,21	4,09	4,45	3,69	3,62	3,91	3,67	3,72
Média	5,17	4,57	4,36	4,44		3,71	3,65	3,85	3,63	
			F				F			
Dose de gesso			3,24*				1,16 <sup>ns</sup>			
Tempo			25,88*				3,41*			
Dose de gesso*Tempo			1,08 <sup>ns</sup>				0,73 <sup>ns</sup>			
C.V. (%)			3,45				3,1808			

\* Significativo a 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo.

De forma geral, se observou elevação das concentrações de Ca trocável no solo de acordo com a dose aplicada. Os teores de Ca trocável nas camadas 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m aumentaram com a quantidade de gesso aplicada ao solo. Não foi detectado efeito das doses de gesso aplicadas para a concentração de Ca trocável na profundidade de 0,4-0,6 m, possivelmente, devido o Ca ter sido lixiviado para camadas mais profundas do solo em razão da mineralogia arenosa do perfil avaliado (Figura 3).

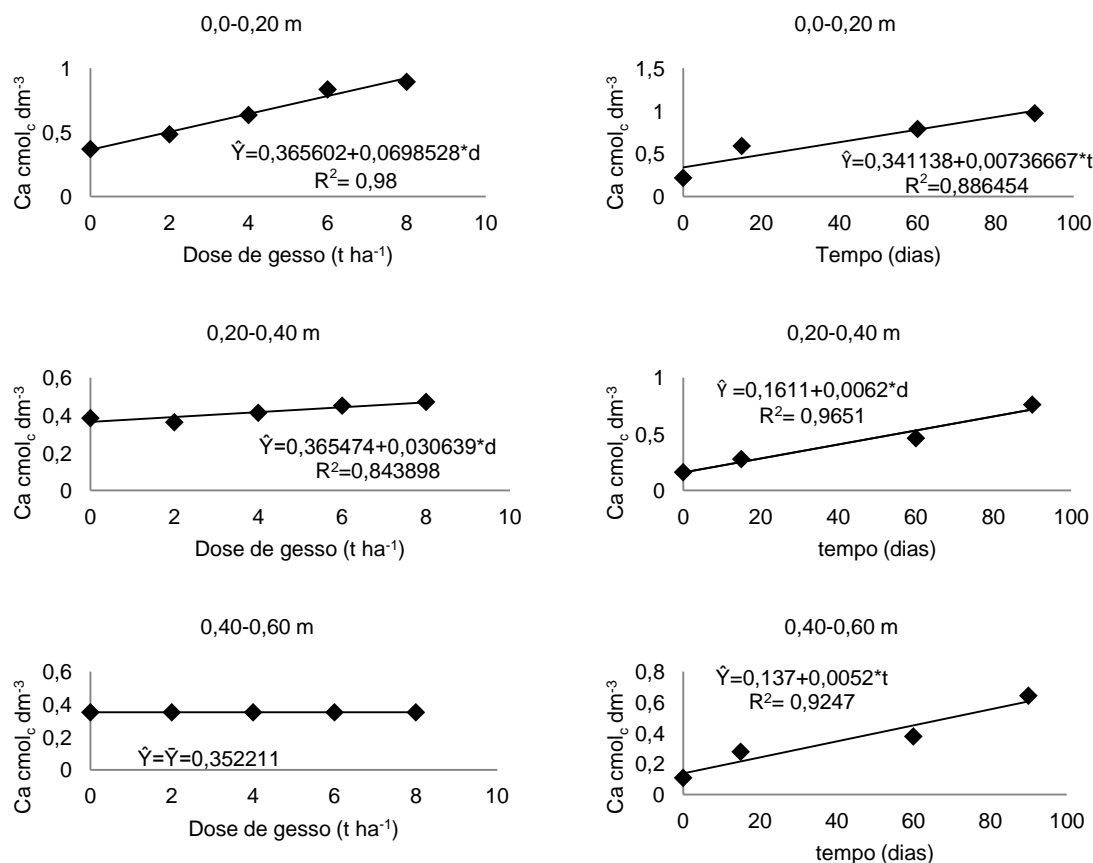


Figura 3: Regressões dos teores de cálcio trocável em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato dele com o solo em diferentes profundidades.

O comportamento do Ca no perfil do solo é uma das características químicas mais expressivas e de longa data observado em experimentos com gesso. O aumento dos teores de Ca<sup>2+</sup> no solo é devidamente esperado visto o gesso ser um composto rico em Ca. A aplicação de gesso no solo promove maior e melhor distribuição de Ca no perfil do solo e em profundidade (Silva *et al.*, 1997; Caires *et al.*, 1998; Rocha, 2007; Rocha *et al.*, 2008; Caires *et al.*, 2011). Este comportamento é explicado devido à solubilidade do gesso (2,41 g L<sup>-1</sup>), a estabilidade do seu ânion acompanhante (sulfato-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) na solução do

solo e a não alteração das cargas elétricas do solo, que poderiam adsorver o  $\text{Ca}^{2+}$  não promovendo, assim, sua lixiviação para camadas mais profundas do solo (Sun *et al.*, 2000; Ernani *et al.*, 2001; Ribeiro *et al.*, 2009).

Os teores de Ca trocável nas camadas superficial (0-0,2 m) e subsuperficial (0,2-0,4 m) foram de 1,56 e 0,89  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ , respectivamente, ao final de três meses de contato do gesso com o solo, quando se aplicou a dose máxima de 8  $\text{t ha}^{-1}$  de gesso mineral, enquanto que no tratamento controle (sem adição de gesso mineral) para ambas as profundidades (0-0,2 e 0,2-0,4 m), se observou acréscimo no teor do Ca trocável, não ultrapassando 0,68  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  ao final dos três meses de avaliação do experimento (Tabela 2). Esse acréscimo no teor do Ca trocável no tratamento controle pode ser resultado do seu aporte por meio da água de irrigação utilizada ou pela contaminação por parcelas adjacentes devido à deriva do gesso pela ação do vento.

A regressão dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  em função do tempo de contato do gesso com o solo comprova que em qualquer profundidade estudada há um aumento expressivo dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  com o tempo (Figura 3), indicando a necessidade de se aplicar gesso antecedendo o plantio, possibilitando que ele reaja satisfatoriamente no solo e possa atuar como corretivo e condicionador.

A lixiviação de  $\text{K}^+$  das camadas superficiais do solo devido à aplicação de gesso é tema contraditório, existindo relatos de sua lixiviação, bem como da sua não lixiviação no perfil do solo (Dias, 1992; Caires *et al.*, 1998; Farina *et al.*, 2000; Saldanha *et al.*, 2007; Zambrosi *et al.*, 2007b; Soratto e Crusciol, 2008).

Nesse trabalho não foi observado efeito das doses de gesso aplicadas sobre os teores de  $\text{K}^+$  na camada superficial do solo (0-0,2 m) e subsuperficial (0,4-0,6 m). Para a camada de 0,2-0,4 m se observou acréscimo no teor de  $\text{K}^+$  em função das doses aplicadas (Figura 4), indicando um alerta quanto a possibilidade do gesso está promovendo essa lixiviação. O aumento de K em subsuperfície, mesmo que mínimo, pode ter sido ocasionado pela lixiviação de  $\text{K}^+$  para a camada mais profunda do solo pela formação de par iônico neutro com o  $\text{SO}_4^{2-}$ , formando ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) (Dias, 1992; Caires *et al.*, 1998), aporte de K na forma de impurezas no próprio gesso utilizado (Lapido-Loureiro e

Nascimento, 2009), visto este ser proveniente de jazidas minerais ou devido a água de irrigação utilizada. .

As regressões que apresentam teores de  $K^+$  em função do tempo de contato do gesso com o solo não demonstraram arraste de  $K^+$  e acúmulo em subsuperfície (Figura 4), não evidenciando efeito do gesso sobre a lixiviação de  $K^+$ .

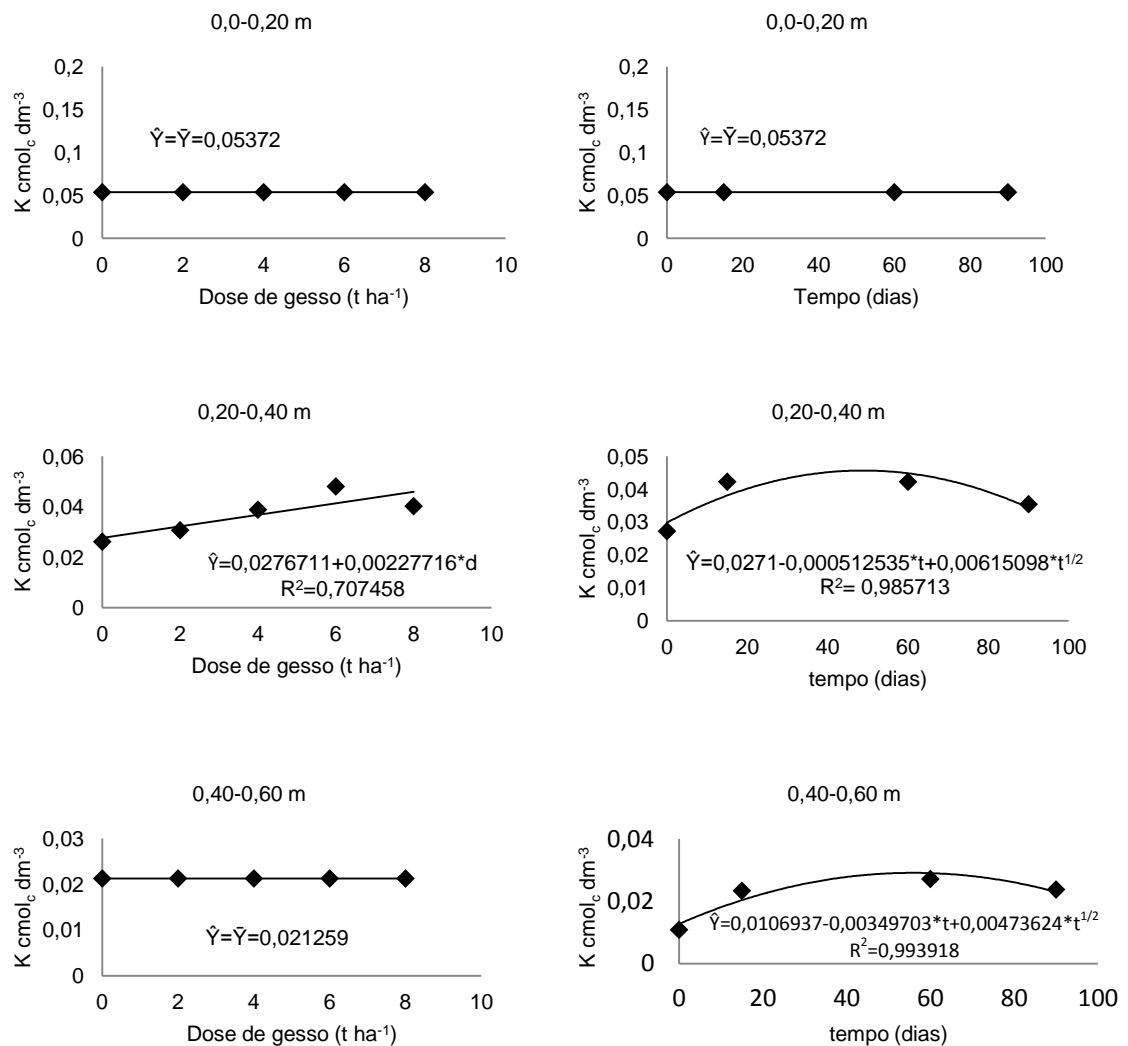


Figura 4. Regressões dos teores de potássio trocável em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato com o solo em diferentes profundidades.

As doses de gesso mineral não influenciaram os teores de  $Mg^{2+}$  em nenhuma das camadas avaliadas (Figura 5). Esses resultados contradizem os obtidos na literatura (Silva *et al.*, 1997; Feldhake *et al.*, 2001; Caires *et al.*, 2003; Zambrosi *et al.*, 2007a; Soratto e Crusciol, 2008), que observaram



lixiviação de  $Mg^{2+}$  devido à aplicação de gesso, porém estão de acordo com Saldanha *et al.* (2007).

Em ensaios de campo essa influência do gesso na lixiviação de  $Mg^{2+}$  é atenuada quando comparada a ensaios em colunas de PVC, porque efeitos de lixiviação lateral pelas paredes da coluna não existem em condições de campo e a formação do par iônico do  $SO_4^{2-}$  com o  $Mg^{2+}$  é preterida em relação ao  $Ca^{2+}$ .

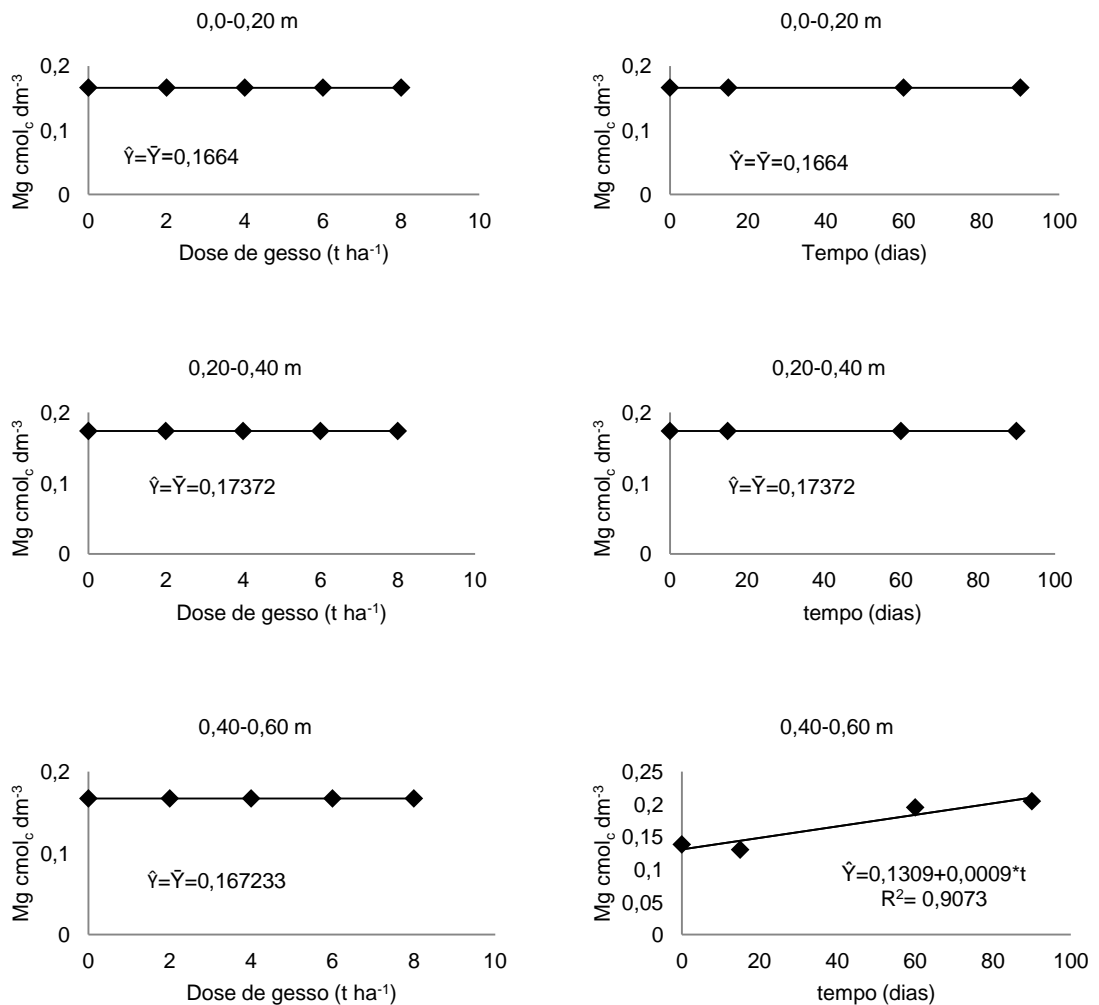


Figura 5. Regressões dos teores de magnésio trocável em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato dele com o solo em diferentes profundidades.

Os teores de  $Al^{3+}$  em subsuperfície foram influenciados pelas doses de gesso aplicadas ao solo, como é desejável quando se recomenda gesso como condicionador de camadas mais profundas do perfil do solo. Isso se evidenciou na camada 0,4-0,6 m de profundidade (Figura 6).

A redução dos teores de  $\text{Al}^{3+}$  em profundidade pela aplicação de gesso é comumente relatada na literatura (Silva *et al.*, 1997; Sun *et al.*, 2000; Soratto e Crusciol, 2008). Esta diminuição é atribuída ao íon sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) que, ao formar par iônico com o Al, indisponibiliza a forma trocável ou lixivia ele para camadas mais profundas do solo com a água de percolação (Carvalho e Raij, 1997; Sun *et al.*, 2000; Saldanha *et al.*, 2007; Soratto e Crusciol, 2008).

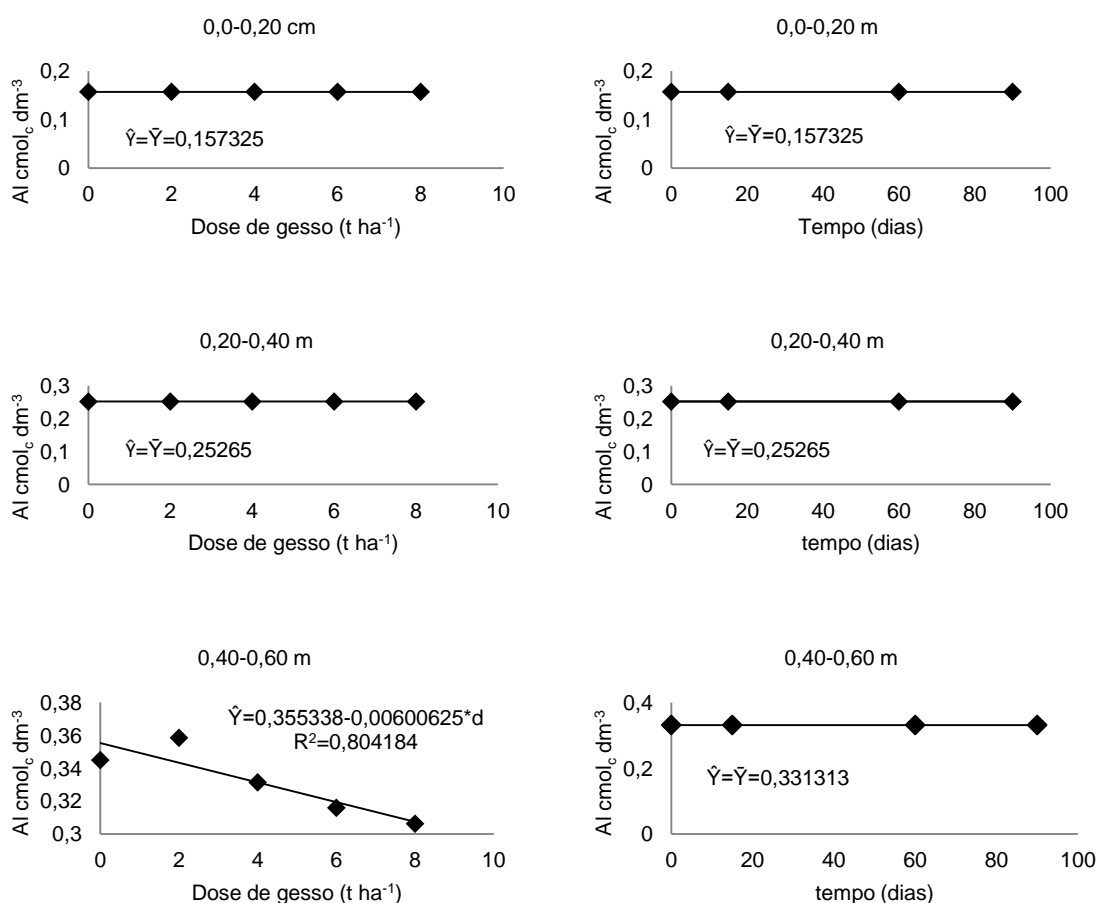


Figura 6. Regressões dos teores de alumínio trocável em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato dele com o solo em diferentes profundidades.

As doses de gesso proporcionaram redução da saturação por Al do solo em subsuperfície (Figura 7). Esse é o efeito que mais se deseja quando se aplica gesso mineral ao solo, porque significa que houve redução dos teores de  $\text{Al}^{3+}$  (Figura 6) e aumento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  (Figura 4). Especificamente no caso deste trabalho, o efeito positivo da aplicação de gesso é potencializado, porque a saturação por Al se reduz, devido à redução do  $\text{Al}^{3+}$  e o aumento apenas do  $\text{Ca}^{2+}$  e não de  $\text{K}^+$  (Figura 4) e  $\text{Mg}^{2+}$  (Figura 5).

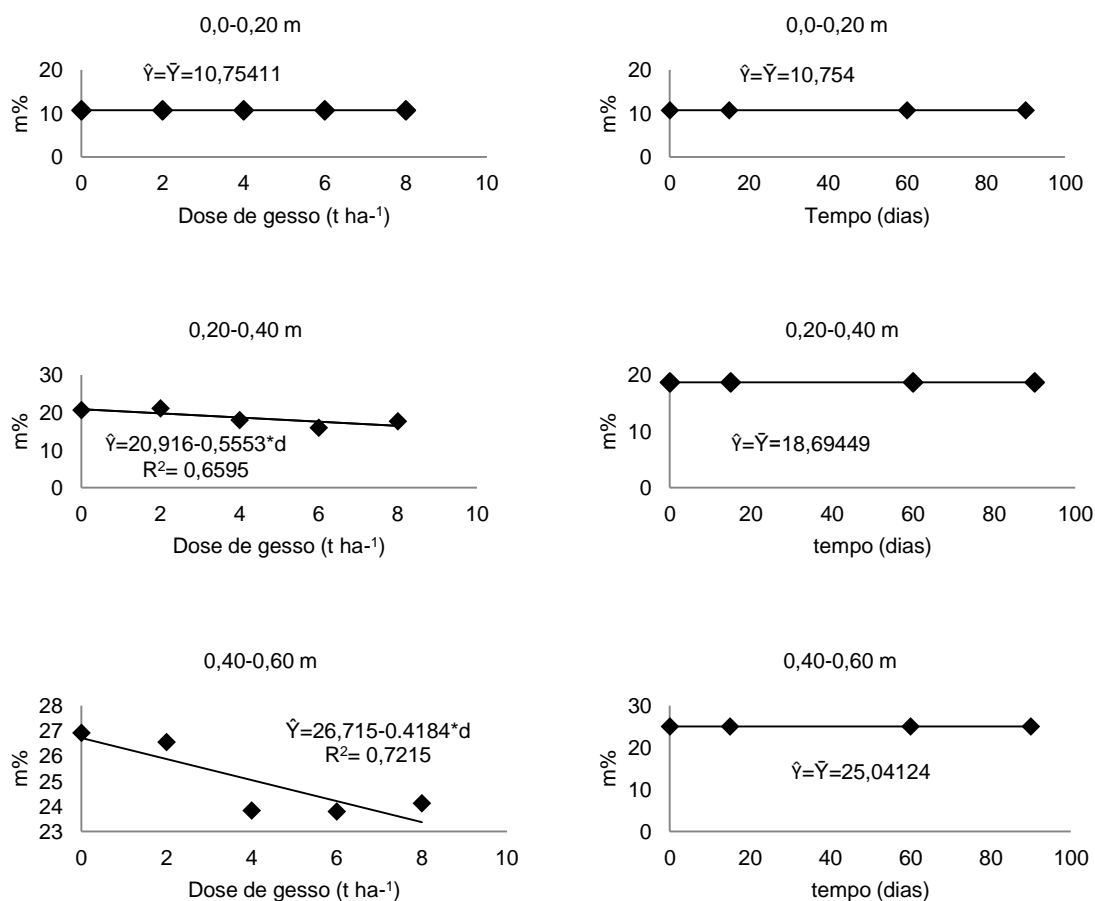


Figura 7. Regressões dos valores da saturação por alumínio em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato dele com o solo em diferentes profundidades.

A diminuição da saturação por Al é uma característica comumente observada em trabalhos com gesso, principalmente em profundidade (Carvalho e Raij, 1997; Saldanha, 2005).

Os teores de  $SO_4^{2-}$  aumentaram em profundidade, sendo que nas camadas iniciais (0,0-0,2 e 0,2-0,4 m) houve efeito significativo da interação dose de gesso aplicada e tempo de contato com o solo, enquanto que na camada subsuperficial (0,40-0,60 m) os efeitos significativos se restringiram apenas aos efeitos principais (Figura 8).

Por ser um mineral sulfatado, o gesso aumenta os teores de  $SO_4^{2-}$  no solo. Em relação ao tempo de contato com o solo, o aumento desses teores de  $SO_4^{2-}$  no solo deve ser decorrente da mineralização da matéria orgânica presente no solo em que o experimento foi instalado, pois, a matéria orgânica é uma importante fonte de  $SO_4^{2-}$  para o solo (Silva *et al.*, 2004; Dechen e Nachtigall, 2007). Adicionalmente, mesmo sendo mais solúvel do que o

calcário, o gesso ainda apresenta solubilidade baixa, necessitando de tempo para liberar seus principais constituintes, como  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ . A elevação dos teores de S no solo pela utilização do gesso é observada na literatura (Caires *et al.*, 2011) sendo, também, observados efeitos positivos no aumento da produtividade das culturas (Fernandes *et al.*, 2007).

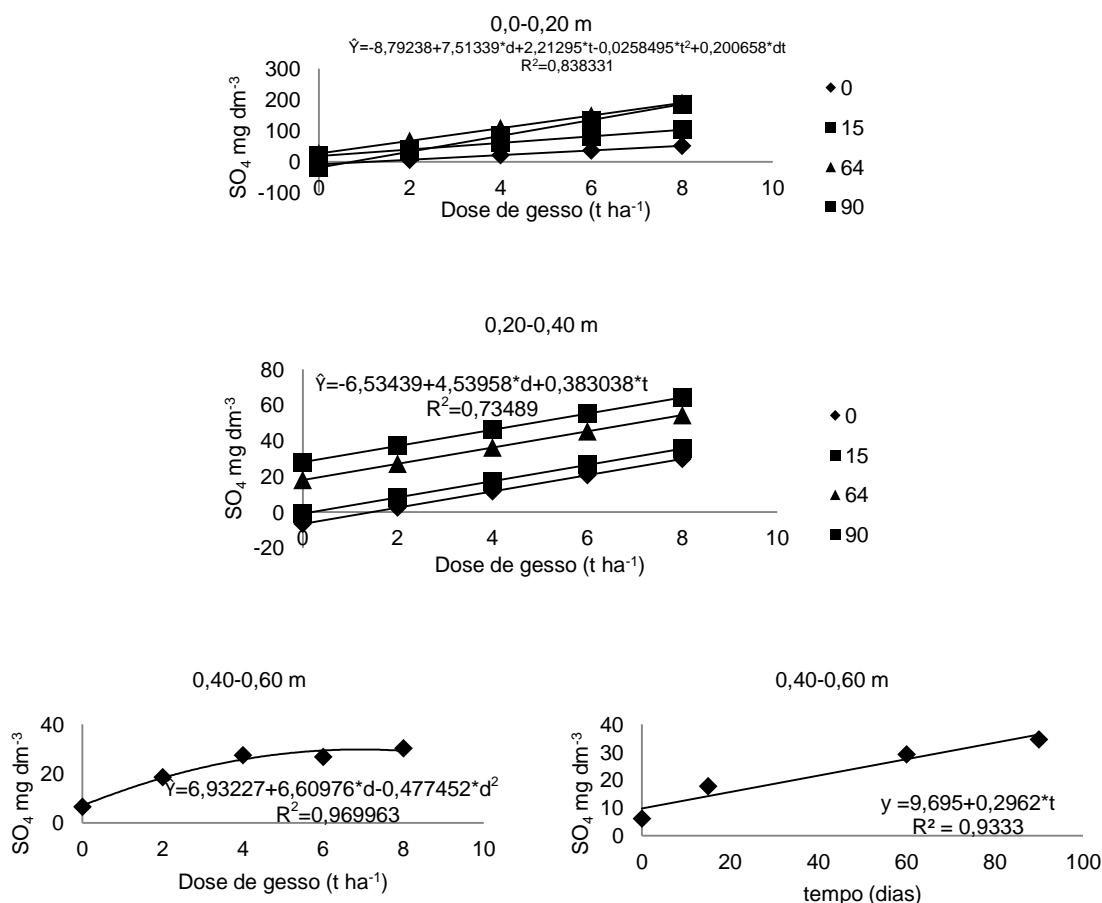


Figura 8. Regressões dos teores de sulfato em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato dele com o solo em diferentes profundidades.

A análise de regressão mostrou que a aplicação de gesso mineral não influenciou o pH em água do solo, porém o tempo de contato do gesso com o solo mostrou que houve redução (Figura 9).

A redução do pH em água é comumente observada em trabalhos com gesso, contudo, esse efeito é devido a ação de sais solúveis, aumento da concentração de eletrólitos, que deslocam o  $\text{Al}^{3+}$  para a solução, reduzindo

seus valores, portanto, o gesso não possui ação direta na redução do pH do solo (Veloso *et al.*, 1992; Maria *et al.*, 1993; Ernani *et al.*, 2001).

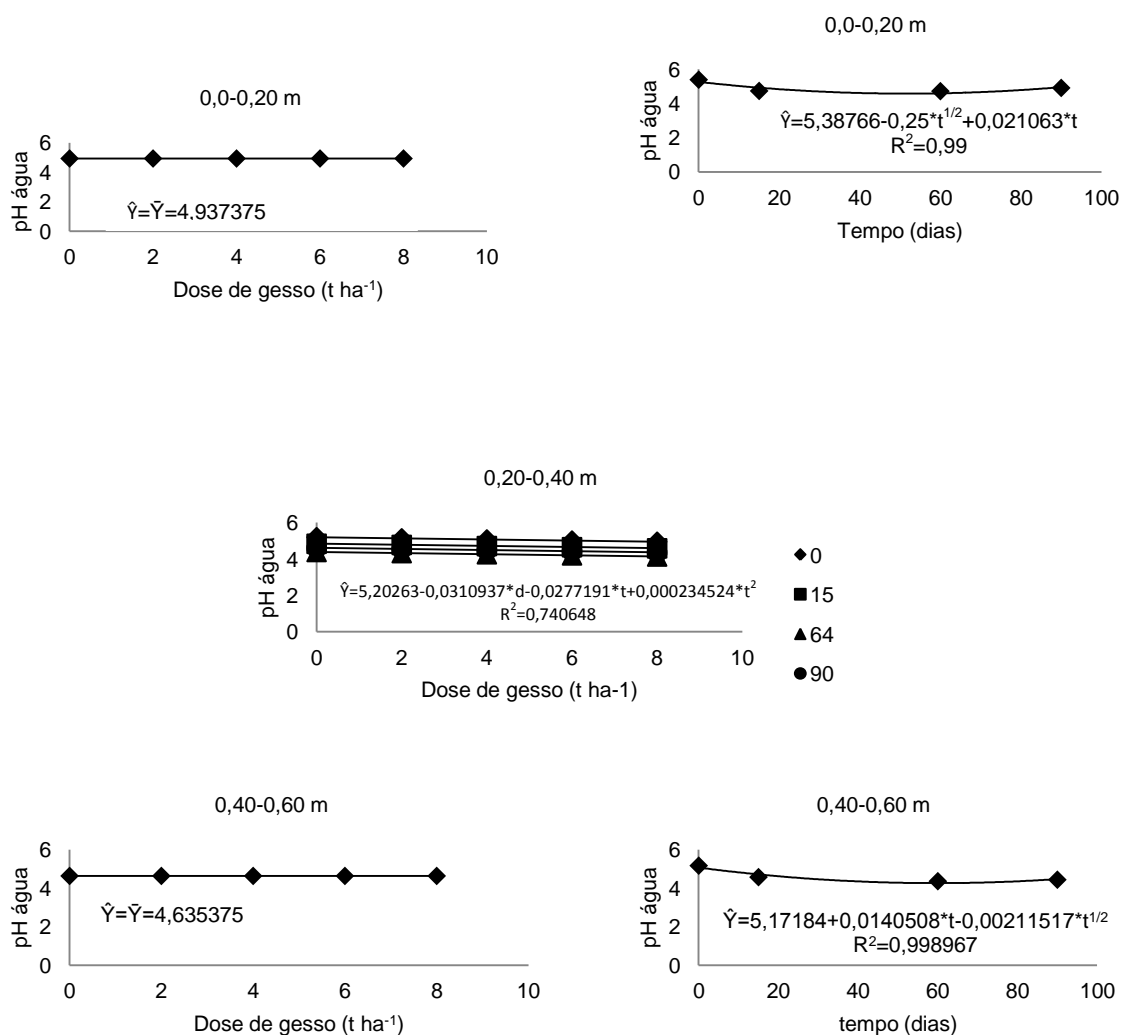


Figura 9. Regressões dos valores de pH em água em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato dele com o solo em diferentes profundidades.

Uma forma de se averiguar que o gesso não promove redução do pH é utilizando soluções com concentrações iônicas definidas para a leitura do pH (Carvalho e Raji, 1997). Assim, nesse trabalho mensurou-se o pH também em cloreto de Ca e comprovou-se que as doses de gesso aplicadas e o tempo de contato do gesso com o solo não influenciaram o pH (Figura 10).

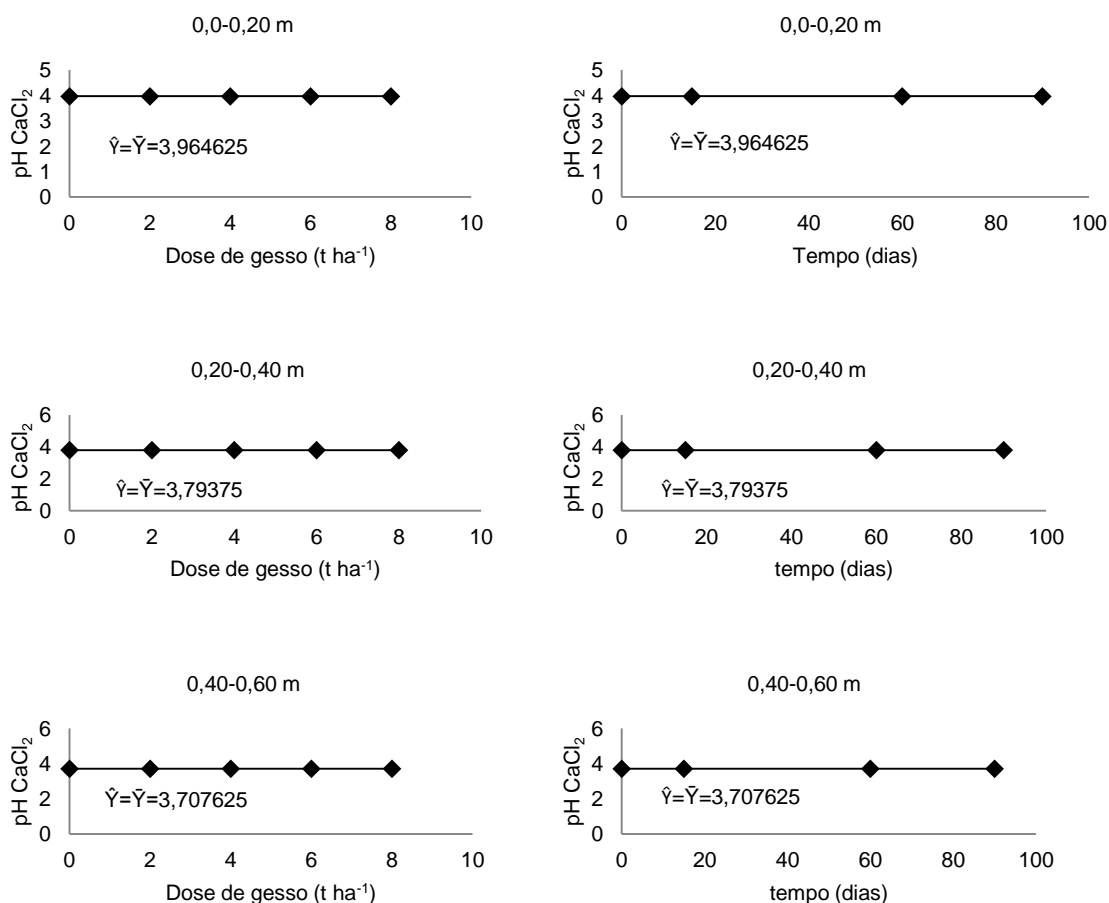


Figura 10. Regressões dos valores de pH em cloreto de cálcio em função da aplicação de diferentes doses de gesso e do tempo de contato com o solo em diferentes profundidades.

#### 4.2. Alteração de atributos físicos do solo pela aplicação de doses crescentes de gesso mineral

Mesmo com toda a importância que as propriedades físicas possuem para os processos de infiltração e redistribuição de água, erosão e crescimento radicular das plantas, os atributos físicos do solo são características pouco estudadas em experimentos com gesso mineral (Kemper e Chepil, 1965; Castro Filho *et al.*, 1998; Lebron *et al.*, 2002; Rosa Junior *et al.*, 2006; Rasouli *et al.*, 2013).

Como com a aplicação de gesso há um elevado incremento de Ca ao solo, é de se esperar que esse cátion possa, como ligante de agregados, proporcionar uma maior agregação e estabilização de agregados. No entanto,

os dados obtidos nesse trabalho não permitiram mostrar esse efeito, porque as doses crescentes de gesso aplicadas ao solo não proporcionaram diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) no diâmetro médio dos agregados, no índice de estabilidade dos agregados, na macro e microporosidade e na percentagem de agregados, com exceção da classe de agregados compreendidos entre 0,5-1,0 mm (Tabela 5).

Tabela 5. Diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico, índice de estabilidade de agregados, macro e microporosidade e percentagem de agregados em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral em Argissolo amarelo distrocoeso, análise da variância e coeficiente de variação dos dados

Fator	Diâmetro		Índice	Porosidade		% de agregados		% da classe de agregados com diâmetros médios				
	DMP	DMG	IEA	Macro	Micro	> 0,5	< 0,125	0,125-0,25	0,25-0,5	0,5-1	1,0-2,0	2,0-4,0
Dose de gesso (t ha <sup>-1</sup> )	mm		%	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>		mm						
0	1,06	0,85	79,29	0,19	0,22	63,48	6,44	8,47	21,19	30,35	16,62	15,80
2	1,01	0,82	76,86	0,15	0,22	59,65	7,53	9,56	22,87	27,92	16,23	14,92
4	1,03	0,84	80,59	0,17	0,21	61,78	6,43	9,85	21,60	29,41	16,65	15,13
6	1,02	0,82	75,97	0,16	0,22	58,16	8,03	10,61	22,80	25,30	16,72	15,56
8	1,06	0,84	76,36	0,19	0,22	61,65	7,47	9,64	20,77	27,09	17,49	16,29
Média	1,04	0,83	77,81	0,17	0,22	60,94	7,18	9,62	21,85	28,01	16,74	15,54
Dose de gesso	0,110 <sup>ns</sup>	0,286 <sup>ns</sup>	0,523 <sup>ns</sup>	0,316 <sup>ns</sup>	1,003 <sup>ns</sup>	0,651 <sup>ns</sup>	1,100 <sup>ns</sup>	0,718 <sup>ns</sup>	0,468 <sup>ns</sup>	3,412*	0,100 <sup>ns</sup>	0,044 <sup>ns</sup>
C.V. (%)	12,612	5,548	7,185	36,037	114,555	8,402	18,987	18,781	12,729	7,636	17,348	33,519

\* significativo ( $p < 0,5$ ); <sup>ns</sup> não significativo

O efeito da ação do gesso sobre a agregação pode não ter sido percebida devido ao pouco tempo decorrido entre a aplicação de gesso e o tempo de realização da amostragem para a avaliação das características que refletem a agregação do solo, que foi de apenas 150 dias. Adicionalmente, avaliou-se a ação do gesso na camada superficial, que após 150 dias da aplicação de gesso, com elevado manejo hídrico e o regime de chuvas, provavelmente foi lixiviado para camadas mais subsuperficiais.

Observou-se que o aumento da dose de gesso aplicada diminuiu a percentagem de agregados com diâmetro entre 1,0 e 0,5 mm mais expressivamente do que nas demais classes de agregados, sendo a diminuição aproximada de 5 unidades entre o tratamento com a dose de gesso aplicada de (6 t ha<sup>-1</sup>) e o tratamento controle ( $p < 0,05$ ) (Tabela 5). A redução na quantidade de agregados entre 1,0 e 0,5 mm pode estar ligada a troca de ligantes trivalentes (Al<sup>3+</sup>) por divalentes (Ca<sup>2+</sup>), ocasionando menor agregação

das partículas, visto que, o  $\text{Al}^{3+}$  possui maior ação floculante do que o  $\text{Ca}^{2+}$  (Nishimura *et al.*, 2005).

Contrariamente ao observado no presente estudo, Rosa Junior *et al.* (2006) observaram aumento de agregados com diâmetro maior que 1 mm e em estudo com solos salino-sódicos Lebron *et al.* (2002) observaram que a aplicação de gesso preveniu a quebra de agregados. Os dados obtidos neste estudo com um solo altamente intemperizado (ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso) foram contrários aos observados pelos autores acima citados. Não foi observado aumento de agregados com maior diâmetro e ocorreu quebra de agregados de menor diâmetro (Tabela 5).

Realizando-se a análise de regressão (Figura 11), observamos que o efeito das doses de gesso não influenciaram significativamente a percentagem de agregados entre 1,0 e 0,5 mm. Como se trata de solos de características mineralógicas e químicas bem diferentes é provável, que o efeito do gesso presente na modificação das características físicas do solo seja pouco expressiva.

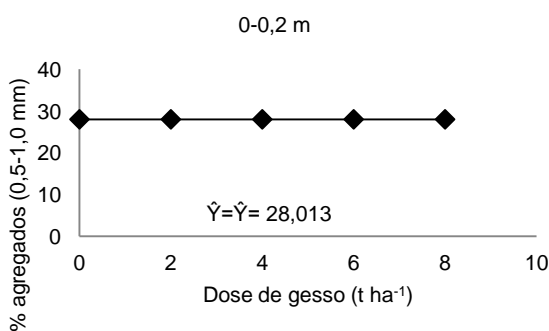


Figura 11. Regressão dos valores da percentagem de agregados com diâmetro médio entre 0,5 e 1,0 mm em função da aplicação de diferentes doses de gesso.

#### 4.3. Alteração nos reservatórios de alumínio pela aplicação de doses crescentes de gesso mineral e seu tempo de contato no solo

A dinâmica do Al no solo é complexa e a adsorção/dessorção deste elemento está envolvida em diversos reservatórios no solo (García-Rodeja *et*



*al.*, 2004). Os principais reservatórios do Al estão ligados à matéria orgânica, a CTC do solo e aos minerais amorfos (García-Rodeja *et al.*, 2004; Coelho *et al.*, 2010).

Não foi observado efeito da aplicação das doses de gesso sobre os reservatórios de Al na camada superficial do solo (0,0-0,2 m). Na camada subsuperficial (0,2-0,4 m) as doses de gesso proporcionaram variações nos reservatórios de Al ligados a matéria orgânica (PIROFOSFATO) e amorfo (OAA) e na camada subsuperficial (0,4-0,6 m) as doses de gesso alteraram as frações de Al nos reservatórios amorfo (OAA) e cristalino (DCB) (Tabela 6).

As doses de gesso proporcionaram aumento do Al amorfo em subsuperfície (0,2-0,4 e 0,4-0,6 m) (Tabela 6). Segundo Takahashi *et al.* (2006) a aplicação de gesso diminui a solubilidade do  $Al^{3+}$ , ocasionando a formação de hidróxidos de Al e minerais alumino-sulfatados de baixa cristalinidade. Álvarez *et al.* (2012) em experimento utilizando calcário como condicionante do solo e Takahashi *et al.* (2006) utilizando fosfogesso, também observaram aumento do Al amorfo no solo. Segundo Childs *et al.* (1983), o Al amorfo dá uma estimativa do Al translocado de camadas superiores, desta forma, se evidencia que a lixiviação de Al é uma das formas pelas as quais o gesso exclui o Al em níveis tóxicos do contato com o sistema radicular das plantas, assim como é preconizado na literatura (Soratto e Crusciol, 2008).

O Al ligado à matéria orgânica (PIROFOSFATO) diminuiu com o tempo de contato do gesso com o solo (0,0-0,2 m) e com as doses de gesso aplicadas, inclusive com sua interação (0,2-0,4 m). As doses de gesso reduziram 0,43 e 0,16 g  $Kg^{-1}$  as quantidades iniciais de Al ligado a matéria orgânica, respectivamente para as doses aplicadas de 4 e 8 t  $ha^{-1}$ , enquanto que no tratamento controle a redução do Al ligado a matéria orgânica foi de apenas 0,02 g  $Kg^{-1}$  (Tabela 6). O aumento da força iônica da solução e a troca do  $Al^{3+}$  pelo  $Ca^{2+}$  nos sítios de adsorção da matéria orgânica, devido às doses de gesso aplicadas ao solo, podem ter liberado o  $Al^{3+}$  ligado à matéria orgânica e propiciado a sua transformação em Al amorfo. Esta hipótese explicaria o aumento observado no teor de Al amorfo extraído com solução de oxalato de amônio (OAA).

Somente foi observado efeito da aplicação de doses crescentes de gesso sobre os teores de Al cristalino do solo na camada subsuperficial (0,4-0,6 m) (Tabela 6). Em média, as doses de gesso aplicadas não interferem nos teores de Al cristalino, embora a dose de 4 t ha<sup>-1</sup> tenha proporcionado uma elevação desse teor, a dose de 8 t ha<sup>-1</sup> apresentou redução significativa. Isso reforça a tese de que o gesso atua apenas nas formas amorfas e ligadas a matéria orgânica, como discutido anteriormente. Mesmo o efeito de massa do Ca<sup>2+</sup>, pressionando a saída de Al de formas cristalinas, não é suficiente para deslocá-lo, pela força das ligações do Al na forma cristalina.

Tabela 6. Teores de alumínio extraído com oxalato ácido de amônio (OAA), pirofosfato de sódio (Prifosfato) e ditionito citrato bicarbonato (DCB) em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral e de diferentes tempo de contato do gesso com o solo em três profundidades, análise de variância e coeficiente de variação dos dados

Fator	OAA		Média	Pirofosfato		Média	DCB		Média
	Tempo (dias)			Tempo (dias)			Tempo (dias)		
	0	15		0	15		0	15	
Dose de gesso (t ha <sup>-1</sup> )	g kg <sup>-1</sup>								
Profundidade 0,0 – 0,2 m									
0	0,80	0,62	0,71	4,37	3,82	4,09	1,25	1,01	1,13
4	0,69	0,55	0,62	3,67	3,40	3,53	1,03	1,07	1,05
8	0,65	0,56	0,60	3,44	2,59	3,01	1,12	0,95	1,04
Média	0,71	0,57		3,82 A	3,27 B		1,13	1,01	
		F			F			F	
Dose de gesso		1,30 <sup>ns</sup>			0,98 <sup>ns</sup>			1,37 <sup>ns</sup>	
Tempo		4,50 <sup>ns</sup>			5,37*			3,37 <sup>ns</sup>	
Dose de gesso*Tempo		1,46 <sup>ns</sup>			0,23 <sup>ns</sup>			1,05 <sup>ns</sup>	
C.V. (%)		10,58			16,25			13,40	
Profundidade 0,2 – 0,4 m									
Dose de gesso									
0	0,65	0,56	0,61 B	4,25 aC	4,22 bC	4,24	1,46	1,34	1,40
4	0,75	0,74	0,75 A	6,37 aA	5,52 bA	5,95	1,58	1,27	1,43
8	0,67	0,68	0,68 A	5,07 aB	4,76 bB	4,92	1,53	1,20	1,37
Média	0,69	0,66		5,23	4,83		1,52 A	1,27 B	
		F			F			F	
Dose de gesso		5,66*			97,67*			0,20 <sup>ns</sup>	
Tempo		0,84 <sup>ns</sup>			15,82*			10,54*	
Dose de gesso*Tempo		0,76 <sup>ns</sup>			5,78*			0,80 <sup>ns</sup>	
C.V. (%)		10,44			42,41			11,60	
Profundidade 0,4 – 0,6 m									
Dose de gesso									
0	0,71	0,82	0,77 C	5,35	4,76	5,06	1,58	1,70	1,64 B
4	0,99	1,02	1,01 A	5,53	5,00	5,27	1,80	1,91	1,86 A
8	0,87	0,85	0,86 B	5,15	4,90	5,03	1,36	1,54	1,45 C
Média	0,86	0,90		5,34	4,89		1,58 B	1,72 A	
		F			F			F	
Dose de gesso		49,16*			0,28 <sup>ns</sup>			80,89*	
Tempo		4,17 <sup>ns</sup>			2,61 <sup>ns</sup>			27,19*	
Dose de gesso*Tempo		3,64 <sup>ns</sup>			0,14 <sup>ns</sup>			0,58 <sup>ns</sup>	
C.V. (%)		4,85			11,72			33,41	

<sup>ns</sup> não significativo (p>0,05); \* significativo (p<0,05); letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas.

#### 4.4. Produtividade, extração de nutrientes e características agrotecnológicas do sorgo influenciadas pela aplicação de doses crescentes de gesso mineral

Os teores de Ca, K, N e P na parte aérea de plantas de sorgo no final do ciclo de cultivo foram influenciados pela aplicação de doses crescentes de gesso mineral, assim como o conteúdo de Ca, Mg e  $\text{SO}_4^{2-}$  (Tabela 7).

Tabela 7. Teor e conteúdo de nutrientes no sorgo sacarino ao final do ciclo de cultivo em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral

Fator	Teor						Conteúdo					
	Ca	Mg	K	N	P	$\text{SO}_4^{2-}$	Ca	Mg	K	N	P	$\text{SO}_4^{2-}$
Dose de gesso (t ha <sup>-1</sup> )	g kg <sup>-1</sup>						kg ha <sup>-1</sup>					
0	1,90	2,35	14,66	5,57	3,72	4,61	15,97	15,90	119,46	52,43	34,73	27,13
2	2,23	2,40	12,05	5,17	3,35	4,30	17,87	22,23	108,26	49,19	30,64	26,16
4	2,69	2,99	12,19	7,34	4,25	5,28	26,09	34,74	105,82	69,47	35,01	50,21
6	2,78	2,64	9,58	6,40	3,55	4,09	24,41	24,41	96,10	55,75	32,98	35,43
8	2,91	2,80	11,11	5,90	3,33	4,95	23,53	25,59	95,30	48,37	26,67	31,75
Média	2,50	2,64	11,92	6,08	3,64	4,65	21,57	24,58	104,99	55,04	32,01	34,14
	F						F					
Dose de gesso	16,241*	2,292 <sup>ns</sup>	37,549*	6,553*	19,556*	2,685 <sup>ns</sup>	12,709*	10,301*	1,454 <sup>ns</sup>	2,457 <sup>ns</sup>	1,756 <sup>ns</sup>	10,102*
C.V. (%)	4,34	6,91	2,54	5,32	2,31	6,38	5,90	8,70	8,03	9,76	8,26	8,68

<sup>ns</sup> não significativo ( $p > 0,05$ ); \* significativo ( $p < 0,05$ )

Vários autores citam que a aplicação de gesso melhora a absorção de água e nutrientes em diversas culturas, em especial os nutrientes K, N, P, Ca, S, além de aumentar a produtividade das mesmas (Carvalho e Raij, 1997; Caires *et al.*, 2001a; Fernandes *et al.*, 2007; Rasouli *et al.*, 2013).

Quando se aplicou análise de regressão, o efeito da aplicação de doses crescentes de gesso nos teores dos nutrientes somente se confirmou para Ca e K, inexistindo para N e P (Figura 12). Para Ca o efeito é positivo, como se esperava, porque o gesso é um fornecedor de Ca e, para K o efeito é negativo, possivelmente devido a elevação da força iônica da solução do solo pelo grande aporte de Ca no sistema o qual provocaria a redução da atividade do K na solução do solo e, assim, seu fluxo para as raízes das plantas. Para N e P,

como a análise da regressão é outra análise, diferente da análise da variância, o ajuste dos dados não permitiu o desenvolvimento de modelo adequado para representar a relação entre o gesso e os teores de N e P.

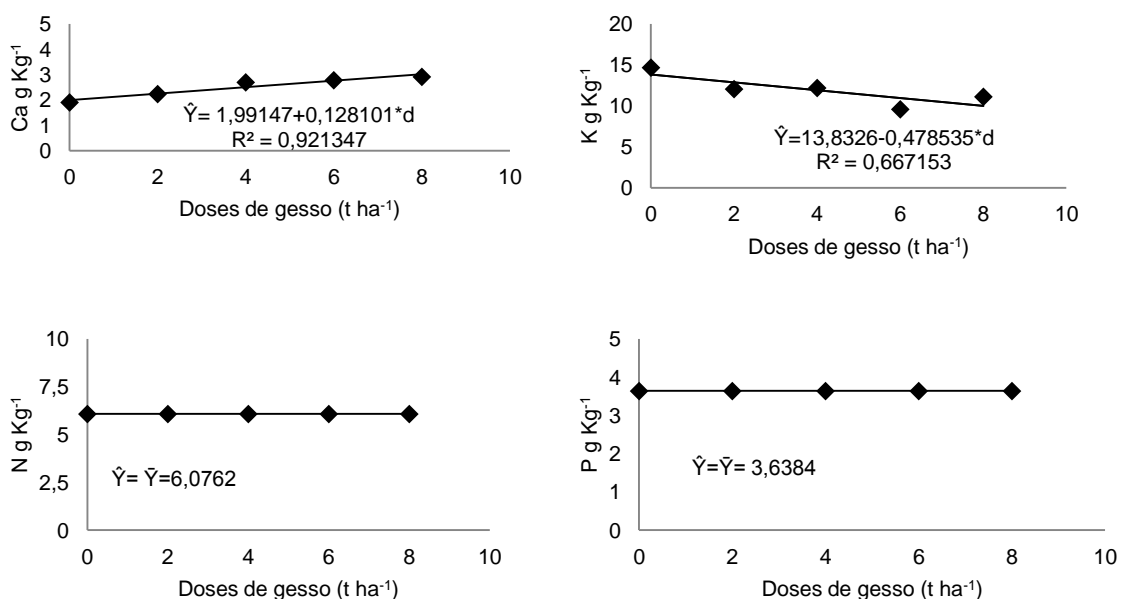


Figura 12. Teor de cálcio, potássio, nitrogênio e fósforo em função da aplicação de doses crescentes de gesso mineral

Quando se utilizou análise de regressão para o conteúdo dos nutrientes em função de doses crescentes de gesso, até o efeito positivo sobre o Ca não foi constatado, provavelmente pela falta de ajuste dos dados (Figura 13). Isso contraria a literatura, porque o aumento da extração de Ca pelo sorgo é esperada devido ao grande aporte de Ca que o gesso promove no solo. Vários autores citam maior extração de Ca por plantas em solos tratados com gesso (Caires *et al.*, 2001a; 2001b; Soratto e Crusciol, 2007).

De maneira geral, os conteúdos de nutrientes extraídos (Kg ha<sup>-1</sup>) pelo sorgo variaram de 26,67-35,01 para o P, 26,16-50,21 para o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 48,37-69,47 para o N, 15,97-26,09 para o Ca, 15,90-34,74 para o Mg e 95,30-119,46 para o K. Observando a seguinte ordem decrescente de extração de nutrientes: K>N>P>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>Ca>Mg. Assim como reportado por Coelho (2011), observou-se que os nutrientes K e N são os nutrientes mais exigidos pelo sorgo. No entanto, para o Ca, Mg e P o autor acima citado afirma que o sorgo possui ordem de exigência destes nutrientes da seguinte forma Ca>Mg>P, não sendo observado este padrão no presente estudo. A ordem de extração dos nutrientes (conteúdo) Ca, Mg e P no presente estudo foi P>Ca>Mg. Segundo Santi *et al.*

(2006) os nutrientes que mais afetam o crescimento do sorgo são Ca, N e Mg, nesta ordem. De acordo com os dados obtidos em relação ao conteúdo de nutrientes extraídos, observou-se que a ordem de nutrientes que proporcionariam maiores perdas em produtividade seria  $N > Ca > Mg$ .

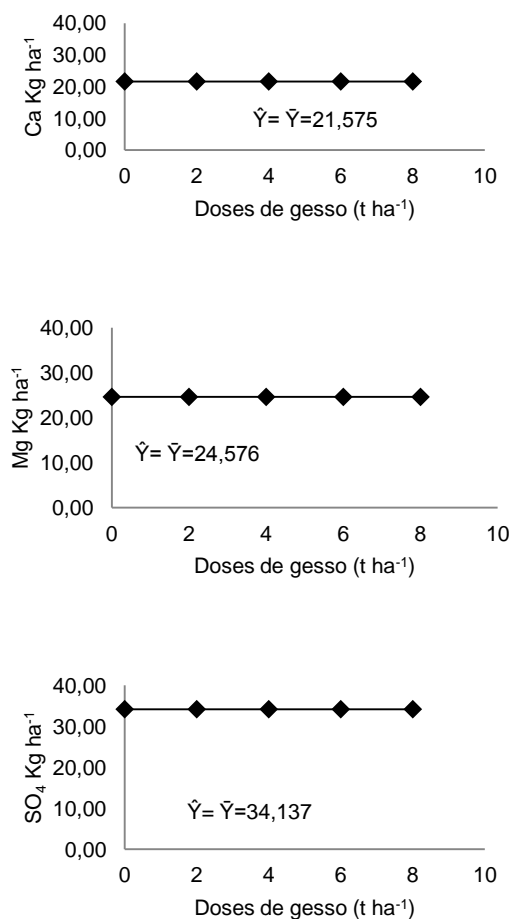


Figura 13. Conteúdo de cálcio, magnésio e sulfato em função da aplicação de doses crescentes de gesso mineral.

O aumento em produtividade das culturas pela aplicação de gesso é bem documentado na literatura (Fernandes *et al.*, 2007; Caires *et al.*, 2011; Rasouli *et al.*, 2013) e este fato é atribuído ao aumento da área de exploração do sistema radicular e absorção de água e nutrientes pelas plantas (Caires *et al.*, 2006).

A produtividade do sorgo é fortemente influenciada pelo genótipo utilizado e as condições ambientais onde a cultura foi instalada (Souza, 2011). A média de produção de massa verde para o sorgo sacarino (467-4-2) é de 10 a 15 t ha<sup>-1</sup> (IPA, 2008, 2012). No entanto para esta mesma variedade, Aguiar *et al.* (2006) observaram produção de massa verde aproximada de 45 t ha<sup>-1</sup>.

Neste experimento a aplicação de doses crescentes de gesso promoveu ganho significativo na produtividade da mesma (Figura 14). Sendo observado acréscimo aproximado de 6.500 Kg quando aplicado 2 t ha<sup>-1</sup> de gesso. As doses de gesso que proporcionaram maiores rendimentos do sorgo foram a de 6 t ha<sup>-1</sup>, seguida pela 4 t ha<sup>-1</sup>, 8 t ha<sup>-1</sup> e 2 t ha<sup>-1</sup> de gesso mineral, que representaram acréscimo de produtividade em relação ao controle de 14.462 kg, 11.445 kg, 9.257 Kg e 6.621 Kg de massa verde, respectivamente. O tratamento que proporcionou maior produtividade do sorgo foi com a adição de 6 t ha<sup>-1</sup> de gesso mineral que atingiu 45.888 Kg ha<sup>-1</sup> de massa verde, aproximadamente 46 t ha<sup>-1</sup>, valor semelhante ao obtido por Aguiar *et al.* (2006).

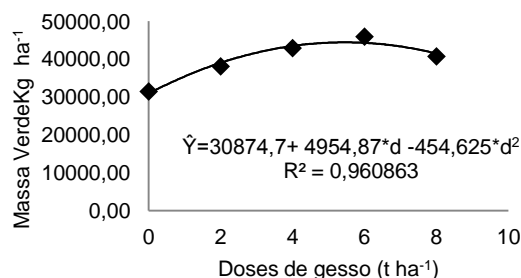


Figura 14. Produção de massa verde do sorgo sacarino em função da aplicação de doses crescentes de gesso mineral.

A produtividade média de massa verde do tratamento controle e do tratamento com maior produtividade (6 t ha<sup>-1</sup> de gesso mineral) foram aproximadamente 30 e 46 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Esta produtividade é duas a três vezes maior do que a observada em sistema de sequeiro (IPA, 2012), fato que pode estar prejudicando a nutrição do sorgo quando este é cultivado sem restrição hídrica, subestimando assim, a correta recomendação de adubação para a cultura. Segundo Oliveira *et al.* (2010) a investigação sobre a extração

de nutrientes e produtividade das culturas sobre condições ideais de disponibilidade de água e nutrientes são necessárias para indicação de doses corretas de nutrientes, para proporcionar a máxima expressão produtiva da cultura.

As doses de gesso mineral promoveram acréscimo aproximado de 500 a 1.300 Kg à massa seca do sorgo dependendo da dose aplicada (Figura 15). A produtividade em massa seca do sorgo sacarino (IPA 467-4-2) está de acordo com a média de 8 t ha<sup>-1</sup> e inferior a média aproximada esperada 15 t ha<sup>-1</sup> (Tabosa *et al.*, 2002; Ipa, 2008), mas, também, foi cerca de 4 vezes superior a obtida por Rodrigues e Leite (1999). Contudo, estes dados estão muito aquém dos obtidos por Curt *et al.* (1998) com a variedade keller cultivada na Espanha na densidade de plantas aproximada de 143.000, semelhante à densidade de plantas utilizada no presente trabalho que foi de 150.000 plantas ha<sup>-1</sup>, o qual obteve produção média de massa seca de 26.700 Kg ha<sup>-1</sup>.

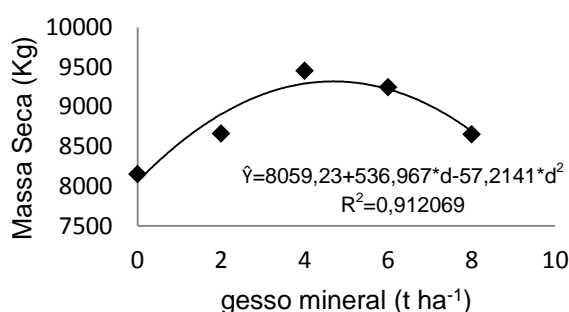


Figura 15. Produção de massa seca do sorgo sacarino em função da aplicação de doses crescentes de gesso mineral.

Devido o sorgo sacarino (IPA 467-4-2) ter sido colhido aos 90 dias após plantio, tempo adequado para colheita para fins de produção de forragem, mas não correspondendo ao final de seu ciclo, portanto, 30 dias antes do final de seu ciclo (ciclo de 120 dias) isto pode ter ocasionado os menores valores de produtividade observada no presente estudo.

Realizando-se a primeira derivada da equação de regressão presente na figura 14 e igualando-a a zero (0) encontramos a dose de máxima eficiência física que corresponde a aproximadamente a 5,5 t ha<sup>-1</sup> de gesso. Considerando a dose de máxima eficiência econômica como sendo 90% da dose de máxima



eficiência física, a dose de máxima eficiência econômica de gesso a ser aplicada para obtenção da maior produtividade econômica corresponde a aproximadamente 4,9 t ha<sup>-1</sup> de gesso mineral.

Todas as características agrotecnológicas do sorgo, exceto a produção de etanol, não foram influenciadas (p>0,05) pelas doses de gesso aplicadas (Tabela 8).

Tabela 8. Características agrotecnológicas do sorgo sacarino em função da aplicação de diferentes doses de gesso mineral

Fator	Características agrotecnológicas										
	POL	PZA	ARcal	PC	ART	FIBRA	ATR	MV	MS	Etanol	
Dose de gesso (t ha <sup>-1</sup> )	%				Kg t <sup>-1</sup>		Kg ha <sup>-1</sup>		L ha <sup>-1</sup>	L t <sup>-1</sup> de planta	
0	2,57	26,27	5,84	0,67	6,54	14,40	57,52	31.425,78	8.152,62	1.267,78	40,22
2	2,68	26,77	5,77	0,70	6,51	14,62	57,33	38.046,88	8.663,68	1.528,08	40,09
4	2,76	27,77	5,72	0,81	6,57	14,35	57,86	42.871,09	9.453,20	1.736,61	40,47
6	2,59	26,81	5,81	0,74	6,59	14,18	58,01	45.888,67	9.246,58	1.863,93	40,57
8	3,24	31,14	5,27	1,02	6,34	16,01	55,80	40.683,59	8.653,71	1.589,89	39,02
Média	2,77	27,75	5,68	0,79	6,51	14,71	57,30	39.783,20	8.833,96	1.594,72	40,08
	F										
Dose de gesso	0,454 <sup>ns</sup>	0,287 <sup>ns</sup>	0,490 <sup>ns</sup>	0,404 <sup>ns</sup>	0,593 <sup>ns</sup>	1,03 <sup>ns</sup>	0,605 <sup>ns</sup>	5,52*	1,19 <sup>ns</sup>	4,13*	0,681 <sup>ns</sup>
C.V. (%)	29,72	26,98	11,98	56,62	3,91	9,90	3,89	11,74	10,78	13,91	3,735

<sup>ns</sup> não significativo, \* significativo (p<0,05). Sacarose em solução (POL), Pureza do caldo (PZA), Açúcares redutores no caldo (ARcal), Percentagem de POL no Sorgo (PC), Açúcares redutores totais (ART) e Açúcares totais recuperáveis (ATR).

Comparativamente com os valores obtidos por Teixeira *et al.* (1997) para AR que variaram de 4,98-6,87%, no presente estudo, foi observado valores similares, variando de 5,27-5,84% (Tabela 8). No entanto, para o teor de sacarose em solução (POL%), açúcares redutores totais (ART) e açúcares totais recuperáveis (ATR), o presente estudo obteve valores menores do que o observado pelo autor acima citado.

A cana-de-açúcar é a principal fonte de matéria prima utilizada para a produção de álcool no Brasil. Em experimento com diversas variedades de cana-de-açúcar, Simões Neto *et al.* (2012) observaram valores de ATR entre 126,92 e 143,53 Kg t<sup>-1</sup>. Costa *et al.* (2011) observaram ATR médio de 128,48 Kg t<sup>-1</sup> ao avaliar quatro cultivares de cana-de-açúcar. Esses valores são

aproximadamente três vezes maiores do que os obtidos no presente estudo com o sorgo sacarino (IPA 467-4-2). Em vista de o ATR ser a medida agrotecnológica de maior importância, devido à indústria sucroalcooleira avaliar o preço da tonelada de cana-de-açúcar em função deste parâmetro (Costa *et al.*, 2011; Simões Neto *et al.*, 2012).

As doses de gesso promoveram aumento da produção de álcool por hectare pelo sorgo. A dose de gesso que promoveu o maior aumento na produtividade do etanol por hectare em relação ao controle foi o tratamento com a aplicação de 6 t ha<sup>-1</sup> o qual obteve acréscimo aproximado de 600,00 L ha<sup>-1</sup> (Tabela 8). A produtividade de etanol por hectare apresentou a mesma tendência do aumento da produtividade de massa verde do sorgo. Desta forma, evidencia-se que o aumento na produtividade de álcool está diretamente ligado ao aumento da produtividade de massa verde do sorgo (Figura 16).

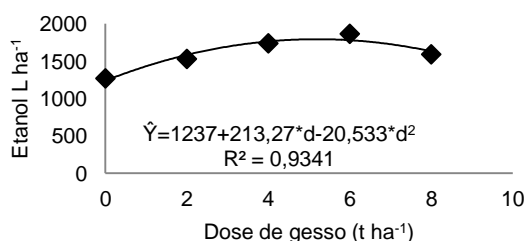


Figura 16. Produção de etanol por hectare em função da aplicação de doses crescentes de gesso mineral.

A produtividade de etanol pela cultura do sorgo pode atingir valores iguais ou mesmo superiores aos obtidos pela cana-de-açúcar aproximadamente 8.000 L ha<sup>-1</sup> (Guigou *et al.*, 2011). Contudo, a média de produtividade frequentemente relatada na literatura está em torno de 2.000-7.500 L ha<sup>-1</sup> (Gnansounou *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2009; Vasilakoglou *et al.*, 2011).

Os resultados obtidos neste trabalho são inferiores aos apresentados pelos autores acima citados. Os menores valores da produtividade de etanol pode ser resultado do momento da colheita (90 dias após o plantio) o qual não foi suficiente para o total desenvolvimento das plantas de sorgo. Contudo, a produtividade média de álcool por tonelada de sorgo está de acordo com os

dados obtidos por (Guigou *et al.*, 2011), aproximadamente 40 L por tonelada de sorgo (tabela 8).

Assim como avaliado para outras cultivares de sorgo sacarino (Gnansounou *et al.*, 2005; Linton *et al.*, 2011), o sorgo sacarino (IPA 467-4-2), tendo como base os valores de ATR e de produtividade, não constitui uma fonte viável de matéria prima para a produção de álcool que possa substituir a cana-de-açúcar. Porém pode ser uma alternativa de cultivo no intervalo de renovação dos canaviais.

## 5. Conclusão

As doses de gesso mineral aplicadas promoveram expressivos efeitos nas características químicas do solo na camada superficial (0-0,2 m), no entanto, as camadas subsuperficiais (0,2-0,4 e 0,4-0,6 m) sofreram poucas modificações pela adição dos tratamentos. Houve redução do  $\text{Al}^{3+}$  e da saturação por alumínio (m%) até 0,4 m de profundidade no perfil do solo e aumento do  $\text{Ca}^{2+}$  nas camadas superficiais (0-0,2 e 0,2-0,4 m). Observou-se aumento das concentrações de  $\text{SO}_4^{2-}$  em todo o perfil estudado (0-0,6 m). Não foi observado efeito para os teores de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e pH.

As características físicas do solo não foram influenciadas pelas doses de gesso, e em especial, não se observou efeitos para a estabilidade de agregados. Portanto, doses de gesso até  $8 \text{ t ha}^{-1}$  não constitui uma forma de manejo que propicie a degradação do solo.

As doses de gesso mineral promoveram alterações, principalmente, nos reservatórios de Al ligados à matéria orgânica e na forma amorfa no solo. Observou-se, de forma geral, que o Al amorfo aumentou em subsuperfície (20-60 cm) em função das doses de gesso aplicadas e que nas camadas superficiais (0-0,4 m) houve decréscimo dos teores de Al ligado à matéria orgânica. O gesso parece exercer força suficiente para deslocar o Al ligado à matéria orgânica das camadas superficiais e lixiviá-lo na forma amorfa para camadas superficiais.

Todas as doses de gesso aplicadas promoveram aumento da produtividade do sorgo. Contudo, recomenda-se a aplicação da dose de  $4,9 \text{ t ha}^{-1}$ , que é responsável pela produção de máxima eficiência econômica. A aplicação de gesso aumentou a absorção de Ca e reduziu a absorção de K. Todos os parâmetros agrotecnológicos avaliados, exceto a produção de etanol, não sofreram influência das doses de gesso aplicadas. A produção de etanol seguiu a tendência da produtividade de massa verde do sorgo, sendo que, os maiores valores obtidos foram correspondentes às maiores produtividades.

## 6. Referências Bibliográficas

AGUIAR, E. M. D.; LIMA, G. F. D. C.; SANTOS, M. V. F. D.; CARVALHO, F. F. R. D.; GUIM, A.; MEDEIROS, H. R. D.; BORGES, A. Q. Rendimento e composição químico-bromatológica de fenos triturados de gramíneas tropicais. *R. Bras. Zootec.* [S.l.], v. 35, n. 6, p. 2226-2232, 2006.

AL-JUNDI, J.; AL-AHMAD, N.; SHEHADEH, A.; AFANEH, F.; MAGHRABI, M.; GERSMANN, U.; HÖLLRIEGL, V.; OEH, U. Investigations of the activity concentrations of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{40}\text{K}$  in Jordan phosphogypsum and fertilizers *Radiation Protection Dosimetry* [S.l.], v. 131, n. 4, p. 449-454, 2008.

ALMODARES, A.; HADI, M. R. Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. *African Journal of Agricultural Research* [S.l.], v. 4, n. 9, p. 772-780, 2009.

ÁLVAREZ, E.; FERNÁNDEZ-SANJURJO, M.; OTERO, X.; MACÍAS, F. Aluminum speciation in the bulk and rhizospheric soil solution of the species colonizing an abandoned copper mine in Galicia (NW Spain). *Journal of Soils and Sediments* [S.l.], v. 11, n. 2, p. 221-230, 2011.

ÁLVAREZ, E.; FERNÁNDEZ-SANJURJO, M. J.; NÚÑEZ, A.; SECO, N.; CORTI, G. Aluminium fractionation and speciation in bulk and rhizosphere of a grass soil amended with mussel shells or lime. *Geoderma* [S.l.], v. 173-174, n. 0, p. 322-329, 2012.

ALVES, A. J. D. O. *Caracterização e potencialidade dos solos da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina*. (1994). 154 p. (Mestrado (Dissertação)) - Agronomia - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE, 1994.

BARROS, M. F. C.; FONTES, M. P. F.; ALVAREZ V, V. H.; RUIZ, H. A. Aplicação de gesso e calcário na recuperação de solos salino-sódicos do estado de Pernambuco. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental* [S.l.], v. 9, n. 3, p. 320-326, 2005.

BEZERRA, M. S. *O potencial dos agrominerais alternativos na região Nordeste do Brasil*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. *Geoderma* [S.l.], v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

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 plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo* [S.I.], v. 27, p. 275-286, 2003.

CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, F. Alteração de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de plantio sem preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo* [S.I.], v. 22, p. 27-34, 1998.

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. *Scientia Agricola* [S.I.], v. 63, p. 370-379, 2006.

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

CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da soja cultivada em sistema de plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. *R. Bras. Ci. Solo* [S.I.], v. 25, p. 1029-1040, 2001b.

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

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* [S.I.], v. 28, p. 125-136, 2004.

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

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *R. Bras. Ci. Solo* [S.I.], v. 22, p. 527-538, 1998.

CHILDS, C. W.; PARFITT, R. L.; LEE, R. Movement of aluminium as an inorganic complex in some podzolised soils, New Zealand. *Geoderma* [S.I.], v. 29, n. 2, p. 139-155, 1983.

CHOHNAN, S.; NAKANE, M.; RAHMAN, M. H.; NITTA, Y.; YOSHIURA, T.; OHTA, H.; KURUSU, Y. Fuel ethanol production from sweet sorghum using repeated-batch fermentation. *Journal of Bioscience and Bioengineering* [S.I.], v. 111, n. 4, p. 433-436, 2011.

COELHO, A. M. Fertilidade do solo, exigências nutricionais e adubação do sorgo sacarino. *Agroenergia em Revista* [S.I.], v. 3, p. 18-19, 2011.

COELHO, A. M.; WAQUIL, J. M.; KARAM, D.; CASELA, C. R.; RIBAS, P. M. Seja o doutor do seu sorgo. *Potafos* [S.I.], n. 14 (arquivo do agrônomo) p. 24, 2002.

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P.; OTERO PÉREZ, X. L.; MARTINS, V. M.; MACÍAS VÁZQUEZ, F. Avaliação de cloretos não tamponados como extratores de alumínio associado à matéria orgânica em solos da planície costeira do estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [S.I.], v. 35, p. 1619-1632, 2011.

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P.; PEREZ, X. L. O.; MARTINS, V. M.; VÁZQUEZ, F. M. Fracionamento do alumínio por técnicas de dissoluções seletivas em espodossolos da planície costeira do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [S.I.], v. 34, p. 1081-1092, 2010.

COMIN, J. J.; BARLOY, J.; BOURIÉ, G.; TROLARD, F. Differential effects of monomeric and polymeric aluminium on the root growth and on the biomass production of root and shoot of corn in solution culture. *European Journal of Agronomy* [S.I.], v. 11, p. 115-122, 1999.

COSTA, C. T. S.; FERREIRA, V. M.; ENDRES, L.; FERREIRA, D. T. D. R. G.; GONÇALVES, E. R. Crescimento e produtividade de quatro variedades de cana-de-açúcar no quarto ciclo de cultivo. *Caatinga (Mossoró, Brasil)* [S.I.], v. 24, n. 3, p. 56-63, 2011.

CURT, M. D.; FERNANDEZ, J.; MARTINEZ, M. Productivity and radiation use efficiency of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cv. Keller in central Spain. *Biomass and Bioenergy* [S.I.], v. 14, n. 2, p. 169-178, 1998.

DA SILVA CÉSAR, A.; OTÁVIO BATALHA, M. Biodiesel production from castor oil in Brazil: A difficult reality. *Energy policy* [S.I.], v. 38, n. 8, p. 4031-4039, 2010.

DA SILVA, R. C.; CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I. Available Phosphorus Evaluated by Three Soil Tests in a Brazilian Tropical Oxisol Treated With Gypsum. *Soil Science* [S.I.], v. 175, n. 5, p. 233-239 10.1097/SS.0b013e3181e04a45, 2010.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). *Fertilidade do Solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap.III. p. 91-132.

DEMIRBAS, A. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management* [S.l.], v. 49, n. 8, p. 2106-2116, 2008.

DEVIREN SAYGIN, S.; CORNELIS, W. M.; ERPUL, G.; GABRIELS, D. Comparison of different aggregate stability approaches for loamy sand soils. *Applied Soil Ecology* [S.l.], v. 54, n. 0, p. 1-6, 2012.

DIAS, L. E. Uso de gesso como insumo agrícola. n. 7 (Comunicado Técnico): CNPBS, 1992. p. 1-6.

EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Rev. Atual, 1997.

EMBRAPA. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes* Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

ENAMORADO, S.; ABRIL, J. M.; MAS, J. L.; PERIÁÑEZ, R.; POLVILLO, O.; DELGADO, A.; QUINTERO, J. M. Transfer of Cd, Pb, Ra and U from phosphogypsum amended soils to tomato plants *Water Air Soil Pollut* [S.l.], v. 203, p. 65-77, 2009.

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. *Scientia Agricola* [S.l.], v. 58, p. 825-831, 2001.

FAHRENHORST, C.; BOTSCHEK, J.; SKOWRONEK, A.; FERRAZ, J. Application of gypsum and lime to increase cation adsorption of a Geric Ferralsol in the Brazilian Amazon region. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* [S.l.], v. 162, n. 1, p. 41-49, 1999.

FARIA, C. M. B.; COSTA, N. D.; FARIA, A. F. Ação de calcário e gesso sobre características químicas do solo e na produtividade e qualidade do tomate e melão. *Horticultura Brasileira* [S.l.], v. 21, n. 4, p. 615-619, 2003.

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P.; THIBAUD, G. R. A Comparison of Strategies for Ameliorating Subsoil Acidity II. Long-Term Soil Effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* [S.l.], v. 64, n. 2, p. 652-658, 2000/3 2000.



FELDHAKE, C. M.; RITCHEY, K. D.; BOYER, D. G. Fate of gypsum surface - applied to an Appalachian hill pasture watershed. *Agriculture water manegment* [S.I.], v. 50, p. 27-39, 2001.

FERNANDES, M. B.; FREIRE, F. J.; COSTA, F. G. B. C. Gesso mineral como fonte de enxofre para a cana-de-açúcar. *Caatinga (Mossoró, Brasil)* [S.I.], v. 20, n. 4, p. 101-109, 2007.

FONTES, M. P. F. Intemperismo de rochas e minerais. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (Ed.). *Pedologia: fundamentos*. Viçosa, MG: SBCS, 2012. Cap.VI. p. 171-202.

GARCÍA-RODEJA, E.; NÓVOA, J. C.; PONTEVEDRA, X.; MARTÍNEZ-CORTIZAS, A.; BUURMAN, P. Aluminium fractionation of European volcanic soils by selective dissolution techniques. *CATENA* [S.I.], v. 56, n. 1–3, p. 155-183, 2004.

GNANSOUNOU, E.; DAURIAT, A.; WYMAN, C. E. Refining sweet sorghum to ethanol and sugar: economic trade-offs in the context of North China. *Bioresource Technology* [S.I.], v. 96, n. 9, p. 985-1002, 2005.

GOSHADROU, A.; KARIMI, K.; TAHERZADEH, M. J. Bioethanol production from sweet sorghum bagasse by *Mucor hiemalis*. *Industrial Crops and Products* [S.I.], v. 34, n. 1, p. 1219-1225, 2011.

GUIGOU, M.; LAREO, C.; PÉREZ, L. V.; LLUBERAS, M. E.; VÁZQUEZ, D.; FERRARI, M. D. Bioethanol production from sweet sorghum: Evaluation of post-harvest treatments on sugar extraction and fermentation. *Biomass and Bioenergy* [S.I.], v. 35, n. 7, p. 3058-3062, 2011.

HERRERO, J.; ARTIEDA, O.; HUDNALL, W. H. Gypsum, a Tricky Material. *Soil Sci. Soc. Am. J.* [S.I.], v. 73, n. 6, p. 1757-1763, 2009/11 2009.

HOLMGREN, G. G. S. A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* [S.I.], v. 31, p. 2010-2011, 1967.

IBGE. Posição e Extensão. 2011. Disponível em:<<http://www.ibge.gov.br/ibgeteen/pesquisas/geo/posicaoextensao.html>>. Acesso em: 25 out. 2011.

IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola. v. 25. n. 8. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2012. p. 1-88.

IPA. *Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação* Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco - IPA, 2008.

IPA. Sorgo sacarino de elevada produção de biomassa para corte e silagem IPA 467-4-2 (seleção 2000). Recife, PE2012.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V. D. F.; ALLEONI, R. F. (Ed.). *Química e mineralogia do solo. Parte I - Conceitos básicos*. Viçosa, MG: SBCS, 2009. Cap.V. p. 333-379.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size Distribution of Aggregates<sup>1</sup>. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling* [S.I.], v. agronomy monogra, n. methodsofsoilana, p. 499-510, 1965 1965.

KUMAR, A.; SAHA, A. Effect of polyacrylamide and gypsum on surface runoff, sediment yield and nutrient losses from steep slopes. *Agricultural Water Management* [S.I.], v. 98, n. 6, p. 999-1004, 2011.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. D. V.; NASCIMENTO, M. O gesso nos agroecossistemas Brasileiros: fontes e aplicações. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E. D. V.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. D. (Ed.). *Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. Cap.15. p. 455-477.

LAVANYA, C.; MURTHY, I. Y. L. N.; NAGARAJ, G.; MUKTA, N. Prospects of castor (*Ricinus communis* L.) genotypes for biodiesel production in India. *Biomass and Bioenergy* [S.I.], v. 39, n. 0, p. 204-209, 2012.

LEBRON, I.; SUAREZ, D. L.; YOSHIDA, T. Gypsum Effect on the Aggregate Size and Geometry of Three Sodic Soils Under Reclamation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* [S.I.], v. 66, n. 1, p. 92-98, 2002/1 2002.

LEITE, E. M.; CAVALCANTE, L. F.; DINIZ, A. A.; SANTOS, R. V. D.; ALVES, G. D. S.; CAVALCANTE, I. H. L. Correção da Sodicidade de dois solos irrigados em resposta à Aplicação de Gesso agrícola. *Irriga, Botucatu* [S.I.], v. 12, n. 2, p. 168-176, 2007.

LIMA JÚNIOR, M. A.; LIMA, J. F. W. F. Solos Ácidos e Calagem. In: CAVALCANTI, F. J. D. A. (Ed.). *Recomendações de Adubação Para o Estado de Pernambuco: 2ª aproximação*. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco - IPA, 2008. Cap.6. p. 69-79.

LINTON, J. A.; MILLER, J. C.; LITTLE, R. D.; PETROLIA, D. R.; COBLE, K. H. Economic feasibility of producing sweet sorghum as an ethanol feedstock in the southeastern United States. *Biomass and Bioenergy* [S.I.], v. 35, n. 7, p. 3050-3057, 2011.

MAKOI, J. H. J. R.; VERPLANCKE, H. Effect of gypsum placement on the physical chemical properties of a saline sandy loam soil. *Australian journal of Crop Science* [S.I.], v. 4, n. 7, p. 556-563, 2010.

MARIA, I. C. D.; ROSSETTO, R.; AMBROSANO, E.; CASTRO, O. M. D.; NEPTUNE, A. M. L. Efeito da adição de diferentes fontes de cálcio no movimento de cátions em colunas de solo. *Scientia Agricola* [S.I.], v. 50, p. 87-98, 1993.

MAY, A.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; RODRIGUES, J. A. S.; LANDAU, E. C.; PARRELA, R. A. C.; MASSAFERA, R. Cultivares de sorgo para o mercado Brasileiro na safra 2011/2012. In: SORGO, E. M. E. (Ed.). Sete Lagoas, MG: Embrapa, 2011. p. 28.

MCKEAGUE, J. A.; DAY, J. H. DITHIONITE- AND OXALATE-EXTRACTABLE Fe AND Al AS AIDS IN DIFFERENTIATING VARIOUS CLASSES OF SOILS. *Canadian Journal of Soil Science* [S.I.], v. 46, n. 1, p. 13-22, 1966/02/01 1966.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: National conference clays & clays minerals, Ottawa. 1960. p.317-327.

MELO, V. D. F.; CASTILHOS, R. M. V.; PINTO, L. F. S. Reserva mineral do solo. In: MELO, V. D. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). *Química e Mineralogia do Solo*. Viçosa, MG: SBCS, 2009. Cap.IV. p. 251-332.

MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG: SBCS, 2007. Cap.II. p. 65-90.

MOTTA, A. C. V.; MELO, V. D. F. Química dos solos ácidos. In: MELO, V. D. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). *Química e mineralogia do solo: Parte II*. Viçosa, MG: SBCS, 2009. Cap.XVII. p. 313-380.

MUSSER, R. D. S.; LEMOS, M. A.; LIMA, V. L. A. G. D.; MÉLO, E. D. A.; LEDERMAN, I. E.; SANTOS, V. F. D. Caracterização Física e de Produção de Acerola do Banco Ativo de Germoplasma de Pernambuco. *Revista Brasileira de Fruticultura, jaticabal* [S.I.], v. v. 27, p. p. 320-323, 2005.

NISHIMURA, T.; YAMAMOTO, T.; SUZUKI, S.; KATO, M. Effect of Gypsum and Polyacrylamide Application on Erodibility of an Acid Kunigami Mahji Soil. *Soil Science & Plant Nutrition* [S.I.], v. 51, n. 5, p. 641-644, 2005.

NOGUEIRA, L. A. H. Does biodiesel make sense? *Energy* [S.I.], v. 36, p. 3659-3666, 2011.

OLIVEIRA, E. C. A. D.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I. D.; FREIRE, M. B. G. D. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. D. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [S.I.], v. 34, p. 1343-1352, 2010.

OLIVEIRA, M. W.; FREIRE, F. M.; MACÊDO, G. A. R.; FERREIRA, J. J. Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. *Informe Agropecuário, Belo Horizonte* [S.I.], v. 28, n. 239, p. 30-43, 2007.

PODKÓWKA, Z.; PODKÓWKA, L. Chemical composition and quality of sweet sorghum and maize silages. *Journal of Central European Agriculture* [S.I.], v. 12, n. 2, p. 294-303, 2011.

RAGAUSKAS, A. J.; WILLIAMS, C. K.; DAVISON, B. H.; BRITOVSEK, G.; CAIRNEY, J.; ECKERT, C. A.; FREDERICK, W. J.; HALLETT, J. P.; LEAK, D. J.; LIOTTA, C. L.; MIELENZ, J. R.; MURPHY, R.; TEMPLER, R.; TSCHAPLINSKI, T. The Path Forward for Biofuels and Biomaterials. *Science* [S.I.], v. 311, n. 5760, p. 484-489, January 27, 2006 2006.

RAIJ, B. V.; FURLANI, P. R.; QUAGGIO, J. A.; PETTINELLI JÚNIOR, A. Gesso na produção de cultivares de milho com tolerância diferencial ao alumínio em três níveis de calagem. *R. Bras. Ci. Solo* [S.I.], v. 22, p. 101-108, 1998.

RASOULI, F.; KIANI POUYA, A.; KARIMIAN, N. Wheat yield and physico-chemical properties of a sodic soil from semi-arid area of Iran as affected by applied gypsum. *Geoderma* [S.I.], v. 193–194, n. 0, p. 246-255, 2013.

RENTERÍA-VILLALOBOS, M.; VIOQUE, I.; MANTERO, J.; MANJÓN, G. Radiological, chemical and morphological characterizations of phosphate rock and phosphogypsum from phosphoric acid factories in SW Spain. *Journal of Hazardous Materials* [S.I.], v. 181, n. 1–3, p. 193-203, 2010.

RIBEIRO, M. R.; BARROS, M. F. C.; FREIRE, M. B. G. S. Química dos Solos Salinos e Sódicos. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). *Química e Mineralogia do Solo. Parte II - aplicações*. Viçosa, MG: SBPC, 2009. Cap.XIX. p. 450-484.

ROCHA, A. T.; OLIVEIRA, A. C.; RODRIGUES, Á. N.; LIRA JÚNIOR, M. A.; FREIRE, F. J. Emprego do gesso do Araripe na melhoria do ambiente radicular da cana-de-açúcar. *Rev. Bras. Ciênc. Agrár.* [S.I.], v. 3, n. 4, p. 307-312, 2008.

ROCHA, A. T. D. *Gesso mineral na melhoria do ambiente radicular da cana-de-açúcar e implicações na produtividade agrícola e industrial.* (2007). 78 p. (Doctor Scientiae) - Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2007.

RODRIGUES, E. F.; LEITE, I. C. Crescimento de genótipos de sorgo plantados nos sentidos norte-sul e leste-oeste. *Pesq. Agropec. Bras.* [S.I.], v. 34, n. 2, p. 173-179, 1999.

ROSA JUNIOR, E. J.; MARTINS, R. M. G.; ROSA, Y. B. C. J.; CREMOM, C. Calcário e gesso como condicionante químico e físico de um solo de cerrado sob três sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Tropical* [S.I.], v. 36, n. 1, p. 37-44, 2006.

ROTH, C. H.; PAVAN, M. A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. *Geoderma* [S.I.], v. 48, n. 3-4, p. 351-361, 1991.

ROUT, G. R.; SAMANTARAY, S.; DAS, P. Aluminium toxicity in plants: a review. *Agronomie* [S.I.], v. 21, p. 3-21, 2001.

SAEG. Sistema para Análises Estatísticas, Versão 8.0: Fundação Arthur Bernardes UFV - Viçosa [S.I.], 1999.

SALDANHA, E. C. M. *Gesso mineral em cana de açúcar: efeitos no solo e na planta.* (2005). 56 p. Dissertação (mestrado) - Departamento de agronomia, UFRPE, Recife, PE, 2005.

SALDANHA, E. C. M.; ROCHA, A. T.; OLIVEIRA, E. C. A. D.; NASCIMENTO, C. W. A. D.; FREIRE, F. J. Uso do gesso mineral em latossolo cultivado com cana-de-açúcar. *Caatinga (Mossoró, Brasil)* [S.I.], v. 20, n. 1, p. 36-42, 2007.

SANTI, A.; CAMARGOS, S. L.; SCARAMUZZA, W. L. M. P.; SCARAMUZZA, J. F. Deficiência de macronutrientes em sorgo. *Ciência Agrotécnica* [S.I.], v. 30, n. 2, p. 228-233, 2006.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisen oxide des bodens durch extraktion unit saurer ammoniumoxalat-losung. *Z. Pflanzenernaehr* [S.I.], v. 105, p. 194-202, 1964.

SILVA, D. J.; ALVAREZ VENEGAS, V. H.; RUIZ, H. A.; SANT'ANNA, R. Translocação e redistribuição de enxofre em plantas de milho e de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* [S.l.], v. 38, p. 715-721, 2003.

SILVA, J. S. Agroecologia: Base estratégica para a segurança alimentar. *Revista Verde (Mossoró - RN - Brasil)* [S.l.], v. 5, n. 1, p. 1-6, 2010.

SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. D. O.; CERRETA, C. A. Composição da Fase Sólida Orgânica do Solo. In: MEURER, E. J. (Ed.). *Fundamentos de Química do Solo*. Porto Alegre: Genesis, 2004. Cap.4. p. 74-99.

SILVA, N. M. D.; VAN RAIJ, B.; CARVALHO, L. H. D.; BATAGLIA, O. C.; KONDO, J. I. EFEITOS DO CALCÁRIO E DO GESSO NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO E NA CULTURA DO ALGODÃO. *Bragantia* [S.l.], v. 56, p. 389-401, 1997.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; ROCHA, A. T.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A. D. Características agroindustriais da cana-de-açúcar em função da adubação fosfatada, em solos de Pernambuco. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental* [S.l.], v. 16, n. 4, p. 347-354, 2012.

SINDUSGESSO. Sindicato da Indústria do gesso do Estado de Pernambuco. Disponível em: <http://www.sindusgesso.com.br> Acesso em: 25/10/2011.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Cátions hidrosolúveis na parte aérea de culturas anuais mediante aplicação de calcário e gesso em superfície. *R. Bras. Ci. Solo* [S.l.], v. 31, p. 81-90, 2007.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema de plantio direto recém-implantado. *R. Bras. Ci. Solo* [S.l.], v. 32, p. 675-688, 2008.

SORDA, G.; BANSE, M.; KEMFERT, C. An overview of biofuel policies across the world. *Energy policy* [S.l.], v. 38, p. 6977-6988, 2010.

SOUSA, D. M. D.; MIRANDA, L. N. D.; OLIVEIRA, S. A. D. Acidez do Solo e sua Correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; NEVES, J. C. L. (Ed.). *Fertilidade do Solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap.V. p. 206-268.

SOUZA, V. F. *Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de sorgo sacarino*. (2011). 53 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba - MG, 2011.

STIPP, S. R.; CASARIN, V. A importância do enxofre na agricultura Brasileira. *Informações Agronômicas* [S.l.], n. 129, p. 14-20, 2010.

SUN, B.; POSS, R.; MOREAU, R.; AVENTURIER, A.; FALLAVIER, P. Effect of slaked lime and gypsum on acidity alleviation and nutrient leaching in an acid soil from Southern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* [S.l.], v. 57, n. 3, p. 215-223, 2000.

TABOSA, J. N.; REIS, O. V.; BRITO, A. R. M. B.; MONTEIRO, M. C. D.; SIMPLÍCIO, J. B.; OLIVEIRA, J. A. C.; SILVA, F. G.; AZEVEDO NETO, A. D.; DIAS, F. M.; LIRA, M. A.; TAVARES FILHO, J. J.; NASCIMENTO, M. M. A.; LIMA, L. E.; CARVALHO, H. W. L.; OLIVEIRA, L. R. Comportamento de cultivares de sorgo forrageiro em diferentes ambientes agroecológicos dos estados de Pernambuco e Alagoas. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo* [S.l.], v. 1, n. 2, p. 47-58, 2002.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TAKAHASHI, T.; IKEDA, Y.; NAKAMURA, H.; NANZIO, M. Efficiency of gypsum application to acid Andosols estimated using aluminum release rates and plant root growth. *Soil Science and Plant Nutrition* [S.l.], v. 52, p. 584-592, 2006.

TEETOR, V. H.; DUCLOS, D. V.; WITTENBERG, E. T.; YOUNG, K. M.; CHAWHUAYMAK, J.; RILEY, M. R.; RAY, D. T. Effects of planting date on sugar and ethanol yield of sweet sorghum grown in Arizona. *Industrial Crops and Products* [S.l.], v. 34, n. 2, p. 1293-1300, 2011.

TEIXEIRA, C. G.; JARDINE, J. G.; BEISMAN, D. A. Utilização do sorgo sacarino como matéria-prima complementar à cana-de-açúcar para obtenção de etanol em microdestilaria. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* [S.l.], v. 17, p. 248-251, 1997.

TEIXEIRA, C. G.; JARDINE, J. G.; NICOLELLA, G.; ZARONI, M. H. Influência da época de corte sobre o teor de açúcares de colmos de sorgo sacarino. *Pesq. Agropec. Bras.* [S.l.], v. 34, n. 9, p. 1601-1606, 1999.

VAN DER HEIJDE, H. B.; KLIJN, P.-J.; PASSCHIER, W. F. Radiological Impacts of the Disposal of Phosphogypsum. *Radiation Protection Dosimetry* [S.l.], v. 24, n. 1-4, p. 419-423, August 1, 1988 1988.

VAN RAIJ, B.; FURLANI, P. R.; QUAGGIO, J. A.; PETTINELLI JÚNIOR, A. Gesso na produção de cultivares de milho com tolerância diferencial ao alumínio em três níveis de calagem. *R. Bras. Ci. Solo* [S.l.], v. 22, p. 101-108, 1998.

VASILAKOGLU, I.; DHIMA, K.; KARAGIANNIDIS, N.; GATSI, T. Sweet sorghum productivity for biofuels under increased soil salinity and reduced irrigation. *Field Crops Research* [S.I.], v. 120, n. 1, p. 38-46, 2011.

VELOSO, C. A. C.; BORGES, A. L.; MUNIZ, A. S.; VEIGAS, I. A. D. J. M. Efeito de diferentes materiais no pH do solo. *Scientia Agricola* [S.I.], v. 49, p. 123-128, 1992.

VISSER, E. M.; FILHO, D. O.; MARTINS, M. A.; STEWARD, B. L. Bioethanol production potential from Brazilian biodiesel co-products. *Biomass and Bioenergy* [S.I.], v. 35, n. 1, p. 489-494, 2011.

VOROPAEVA, Z.; TROTSSENKO, I.; PARFENOV, A. Changes in the properties of a crusty solonetz with soda salinization after single and repeated amelioration with phosphogypsum. *Eurasian Soil Science* [S.I.], v. 44, n. 3, p. 314-325, 2011.

VYSHPOLSKY, F.; QADIR, M.; KARIMOV, A.; MUKHAMEDJANOV, K.; BEKBAEV, U.; PARODA, R.; AW-HASSAN, A.; KARAJEH, F. Enhancing the productivity of high-magnesium soil and water resources in Central Asia through the application of phosphogypsum. *Land Degradation & Development* [S.I.], v. 19, n. 1, p. 45-56, 2008.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Calcium in Plants. *Annals of Botany* [S.I.], v. 92, n. 4, p. 487-511, October 1, 2003 2003.

XIMENES, P. A.; FREIRE, A. C.; JÚNIOR, W. N. M. Avaliação do potencial agrônômico de algumas cultivares de sorgo sacarino (*Sorghum bicolor*). *Anais Esc. Agron. e Vet.* [S.I.], v. 18, n. 1, p. 109-115, 1988.

ZAFNEJAD, M.; CLARK, R. B.; SULLIVAN, C. Y. Aluminum and water stress effects on growth and proline of sorghum. *Journal of Plant Physiology* [S.I.], v. 150, n. 3, p. 338-344, 1997.

ZAMBROSI, F.; ALLEONI, L.; CAIRES, E. Nutrient concentration in soil water extracts and soybean nutrition in response to lime and gypsum applications to an acid Oxisol under no-till system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* [S.I.], v. 79, n. 2, p. 169-179, 2007a.

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 *Ciência Rural* [S.I.], v. 37, n. 1, 2007b.



ZANARDO, A.; MARQUES JÚNIOR, J. Conceitos básicos em mineralogia. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). *Química e mineralogia do solo: Parte I - conceitos básicos*. Viçosa, MG: SBCS, 2009. Cap.II. p. 73-150.

ZEGADA-LIZARAZU, W.; MONTI, A. Are we ready to cultivate sweet sorghum as a bioenergy feedstock? A review on field management practices. *Biomass and Bioenergy* [S.I.], v. 40, n. 0, p. 1-12, 2012.

ZHAO, Y. L.; DOLAT, A.; STEINBERGER, Y.; WANG, X.; OSMAN, A.; XIE, G. H. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. *Field Crops Research* [S.I.], v. 111, n. 1-2, p. 55-64, 2009.

ZHOU, H.; PENG, X.; PERFECT, E.; XIAO, T.; PENG, G. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography. *Geoderma* [S.I.], v. 195-196, n. 0, p. 23-30, 2013.