**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Nutrição e crescimento do eucalipto em resposta a diferentes fontes e
métodos de aplicação de cálcio**

Yesid Alejandro Mariño Macana

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Programa: Recursos Florestais. Opção em:
Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba
2017**

Yesid Alejandro Mariño Macana
Biólogo

Nutrição e crescimento do eucalipto em resposta a diferentes fontes e métodos de aplicação de cálcio

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LEONARDO DE MORAES GONÇALVES**

Versão revisada de acordo com a resolução CoPGr6018de 2011

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Mariño, Yesid Alejandro Macana

Nutrição e crescimento do eucalipto em resposta a diferentes fontes e métodos de aplicação de cálcio / Yesid Alejandro Mariño Macana. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr6018de 2011. - - Piracicaba, 2017.

91 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Fertilidade do solo 2. Nutrição 3. Raízes finas I. Título

DEDICATÓRIA

A minha mãe pelo seu amor e apoio

AGRADECIMENTOS

Ao Professor José Leonardo de Moraes Gonçalves pela oportunidade, orientação, incentivo, amizade e ajuda no desenvolvimento da minha tese.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), a Universidade de São Paulo (USP), ao Departamento de Ciências Florestal (LCF) e a todos os funcionários que contribuíram com minha formação profissional.

Aos professores Luciana Duque Silva e Jean Pierre Bouillet por ser parte de minha formação no doutorado.

A minha mãe, Bertha Macana pelo apoio e conselhos dados durante esse caminho e a Luana Lira Cadete pelo seu amor, carinho e companheirismo.

Ao Programa Temático de Silvicultura e Manejo (PTSM), pela dinâmica de sua forma de trabalho, gestão e apoio logístico e financeiro. Aos integrantes do grupo: Fábio Toledo, Alexandre Ferraz, Eric Ferreira, José Carlos Arthur, José Henrique Bazani, José Henrique Rocha, Estela Foltran, Eduardo Melo, Carolina Brandani, Andrea Wenzel, Carla Papai, Andressa Ávila, Liamara Masullo e José de Deus pelas discussões, amizade e bons momentos nestes anos de doutorado.

Aos estagiários do grupo: Ana Zucon, Patrícia Torquato, Ana Clara Teixeira, Leandro Degrandi, Bárbara Furtado, Nicolas Mateus, Thiago Pilotto, Amanda Franci, Felipe Bianchi, Aleda Martins, Gabriel Valdo, Oscar Esteves, Vitória Duarte e José Renato Drago pela valiosa ajuda no processamento das amostras, discussões e bons momentos compartilhados.

A Universidade Distrital “Francisco José de Caldas”, especialmente ao César Polanco e aos estagiários Camilo Barrero, Angela Sierra e Sandra Diaz pela ajuda no processamento das amostras, as risadas, as discussões e os ótimos momentos vividos.

Aos estagiários Mexicanos Mayra Buendia e Secundino Torres pela sua colaboração.

A Rildo Moreira, Elaine e Lorival e à Estação Experimental de Ciências Florestais Itatinga pela logística e apoio.

A Luiz Silva e a Neia do departamento de solos pelo apoio e orientação na análise das amostras de solo.

A empresa International Paper (IP) e ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), por toda ajuda logística, técnica e econômica fornecida; a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo incentivo dado através da bolsa no Brasil;

Aos amigos conquistados a longo desta etapa: Eleonora Zambrano, Maryeimi Varon, Nelson Casas, Silvia Barrera, Natalia Naranjo, Carolina Rodriguez, Carlos Barrera, Diana Vazques, Karen Cordova, Monica Borda, Marisol Peña, Sergio Arciniegas e a todos os amigos do grupo de risadas e histórias “ColomPira”: Alex, Andres, Bruna, Diana, Diego, Jaime, Jhon, Lucero, Mayra, Natali, Nathaly, Renata, Tais e Wil.

Aos companheiros de República: Raphael, Ailson, Jonathan, Andrea, Pedro e Alex.

A equipe do viveiro da ESALQ: Sabino, Natanael e Amarildo.

EPIÍGRAFE

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”

Charles Chaplin

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	144
1. INTRODUÇÃO	177
2. MATERIAL E MÉTODOS	211
2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	21
2.2. DESENHO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	23
2.3. AVALIAÇÕES	26
2.3.1. ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO	26
2.3.2. BALANÇO NUTRICIONAL	27
2.3.3. AVALIAÇÃO DE RAÍZES FINAS E UMIDADE DO SOLO	27
2.3.4. INVENTÁRIOS E BIOMETRIAS	28
2.3.5. ANÁLISE QUÍMICA FOLIAR	29
2.4. ÍNDICE DE UNIFORMIDADE – PV 50 (%)	29
2.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA	29
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
3.1. EXPERIMENTO 1 - RESPOSTAS ÀS FONTES DE CÁLCIO	30
3.1.1 FERTILIDADE DO SOLO	30
3.1.2. BALANÇO NUTRICIONAL E ABSORÇÃO DE NUTRIENTES	40
3.1.3. DISTRIBUIÇÃO DE RAIZ FINA NO PERFIL DE SOLO E UMIDADE DO SOLO	43
3.1.4. CRESCIMENTO DAS ÁRVORES	47
3.2. EXPERIMENTO 2 - RESPOSTAS À LOCALIZAÇÃO E INCORPORAÇÃO COM CALCÁRIO DOLOMÍTICO	49
3.2.1. FERTILIDADE DO SOLO	49
3.2.2. BALANÇO NUTRICIONAL E ABSORÇÃO DE NUTRIENTES	58
3.2.3. DISTRIBUIÇÃO DE RAIZ FINA NO PERFIL DE SOLO E UMIDADE DO SOLO	60
3.2.4. CRESCIMENTO DAS ÁRVORES	63
3.3. EXPERIMENTO 3 - RESPOSTA À GESSAGEM	66
3.3.1. FERTILIDADE DO SOLO	66
3.3.2. BALANÇO NUTRICIONAL E ABSORÇÃO DE NUTRIENTES	74
3.3.3. DISTRIBUIÇÃO DE RAIZ FINA NO PERFIL E UMIDADE DO SOLO	77
3.3.4. CRESCIMENTO DAS ÁRVORES	80
4. CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS	84

RESUMO

Nutrição e crescimento do eucalipto em resposta a diferentes fontes e métodos de aplicação de cálcio

O eucalipto apresenta bom crescimento em solos com alta acidez trocável e ativa, sendo a calagem uma prática realizada com o objetivo de fornecer Ca^{2+} e Mg^{2+} . No entanto, o seu efeito fica restrito à camada superficial do solo devido à baixa solubilidade dos constituintes neutralizantes. A aplicação de gesso agrícola promove a movimentação de Ca^{2+} e SO_4^{2-} no perfil do solo, possibilitando a melhora do subsolo para favorecer o crescimento radicular. A maioria das plantações de eucalipto no Brasil é estabelecida em solos de baixa fertilidade, verificando-se respostas significativas à fertilização com o fim de garantir a sustentabilidade da produção a longo prazo. O objetivo do presente estudo foi avaliar o crescimento da parte aérea e radicular do eucalipto em resposta à fontes e métodos de aplicação de cálcio em um Neossolo Quartzarênico. Para tal fim, foram mensurados: i) os teores de cálcio, magnésio e enxofre no solo e nas folhas; ii) a densidade de raiz fina (DRF) por biomassa ao longo do perfil e a umidade no solo, e; iii) o crescimento em altura e no diâmetro à altura do peito das árvores de *Eucalyptus*. A fertilização com calcário dolomítico e calcário calcinado em faixa promoveu aumento nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis no solo, especialmente nas camadas superficiais. Os teores foliares de Ca, Mg, K e S encontram-se na faixa adequada nas três datas de amostragem. O volume de tronco das árvores foi superior com a aplicação do calcário dolomítico em faixa comparativamente à aplicação de calcário dolomítico em área total ou incorporado. A mistura de calcário dolomítico com a maior dose de gesso aumentou os teores Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis no solo nas camadas superficiais. A aplicação de gesso aumentou expressivamente os teores de SO_4^{2-} abaixo dos 40 cm de profundidade. A DRF foi superior com a ausência da aplicação das fontes de cálcio. Com a aplicação de gesso agrícola misturado com calcário dolomítico se obteve um volume de madeira similar à aplicação de calcário dolomítico.

Palavras chave: Fertilidade do solo; Nutrição; Raízes finas

ABSTRACT

Growth and nutrition of eucalypts on response to different sources and methods of calcium application.

Eucalyptus plantations have a good development in soils with high exchangeable and active acidity, therefore, being the liming an activity done with the goal of providing Ca^{2+} and Mg^{2+} . However, its effect is restricted to the surface layer due to the low solubility of neutralizing constituents. The application of gypsum promotes the movement of Ca^{2+} and SO_4^{2-} in the soil profile providing a more adequate root growth. Most eucalyptus plantations in Brazil were established in soils of low fertility, verifying significant responses to fertilization in order to ensure the sustainability of long-term production. The aim of this study was to evaluate the nutrition and aerial and root growth of eucalypts in response to different sources and methods of application of calcium in a Quartzipsamment. It was measured: i) calcium, magnesium and sulfur levels in soil and leaf; ii) Fine root density along the profile and soil moisture; iii) Growth in height and DBH of *E. urophylla* plantation. The fertilization with dolomitic and calcitic limestone in furrows promoted an increase in Ca^{2+} and Mg^{2+} levels in the soil, especially in surface layers. The Ca^{2+} and Mg^{2+} foliar levels found in the good range in three times. The volume of eucalypts was increased with dolomitic limestone in furrows comparatively broadcasted distribution and incorporation of dolomitic limestone. The mix of dolomitic limestone and the high gypsum level increases Ca^{2+} and Mg^{2+} levels in the soil in surface layers. Gypsum increases SO_4^{2-} levels below 40 cm deep. The fine root density was higher without calcium fertilization. The volume wood with gypsum more dolomitic limestone applied was similar compared with dolomitic limestone applied.

Keywords: Fine roots; Nutrition; Soil fertility

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Distribuição anual da precipitação pluvial e média mensal da temperatura do município de Santa Rosa de Viterbo, SP. Dados obtidos da série histórica do período de 1950 a 2010.....21
- Figura 2. Precipitação pluvial acumulada registrada pela estação meteorológica pertencente à empresa International Paper, distante a 18 km da área experimental, no período de setembro de 2013 a novembro de 201622
- Figura 3. Balanço hídrico sequencial da área do experimento durante o período de estudo, segundo metodologia de Thornthwaite e Mather (1995). Capacidade de água disponível (CAD) = 60 mm.....22
- Figura 4. Método de coleta de solo na linha (cor cinza) e na entrelinha (cor branco) de plantio para análise de raízes finas. Representação das posições onde foram coletadas as amostras de solo.....28
- Figura 5. Teores de cálcio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de cálcio trocável acumulada na faixa de aplicação das fontes de cálcio aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).....31
- Figura 6. Teores de magnésio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de magnésio trocável acumulada na faixa de aplicação das fontes de cálcio aos 6 (d), 18 (d) e 36 (e) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).....33
- Figura 7. pH em CaCl₂ e acidez trocável aos 6 (a e d), 18 (b e e) 30 (c e f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).....35
- Figura 8. Teores de enxofre aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de enxofre acumulada na faixa de aplicação das fontes de cálcio aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).....37
- Figura 9. Teores de potássio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de potássio trocável acumulada na faixa de aplicação das fontes de cálcio aos 6 (d), 18 (d) e 36 (e) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).....39
- Figura 10. Densidade de raiz fina no perfil de solo aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses e quantidade acumulada de raiz fina em área total aos 6 (d), 18 (e) e 30 (f) meses pós-plantio em Neossolo

Quartzarênico, nos tratamentos: CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$)......44

Figura 11. Teor de água no solo aos 6 (a), 18 (b) e 30 (c) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico, nos tratamentos: CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$)......46

Figura 12. Altura (a) e diâmetro à altura do peito (DAP) (b) ao longo do tempo, nos tratamentos CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. As barras verticais indicam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$)......47

Figura 13. Teor de cálcio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de cálcio trocável acumulada na faixa de aplicação para DOL e DOL INC aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; DOL AT - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em área total; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa; DOL INC - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa incorporado a 20 cm com enxada. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$)......50

Figura 14. Teor de magnésio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses e quantidade de magnésio trocável acumulada na faixa de aplicação para DOL e DOL INC aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; DOL AT - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em área total; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa; DOL INC - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa incorporado a 20 cm com enxada. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$)......51

Figura 15. pH em CaCl₂ aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e acidez trocável aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; DOL AT - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em área total; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa; DOL INC - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa incorporado a 20 cm com enxada. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$)......53

Figura 16. Teor de enxofre aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de enxofre acumulada na faixa de aplicação para DOL e DOL INC aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; DOL AT - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em área total; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa; DOL INC - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa incorporado a 20 cm com enxada. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$)......55

Figura 17. Teor de potássio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de potássio trocável acumulada na faixa de aplicação para DOL e DOL INC aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; DOL AT - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em área total; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa; DOL INC - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em

faixa incorporado a 20 cm com enxada. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).....57

Figura 18. Densidade de raiz fina no perfil de solo aos 6 (a), 18 (b) e 33 (c) meses e quantidade acumulada de raiz fina em área total aos 6 (d), 18 (e) e 30 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; DOL INC – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico incorporado. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$).....61

Figura 19. Teor de água no solo aos 6 (a), 18 (b) e 33 (c) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; DOL INC – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico incorporado. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$).....62

Figura 20. Altura (a) e diâmetro à altura do peito (DAP) (b) ao longo do tempo nos tratamentos: CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; DOL AT - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em área total; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa ; DOL INC – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico incorporado. As barras verticais indicam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$).....64

Figura 21. Teor de cálcio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de cálcio trocável acumulada na faixa de aplicação aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico, nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+ 2GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).....67

Figura 22. Teores de magnésio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de magnésio trocável acumulada na faixa de aplicação aos 6 (d), 18 (e) e 36 meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico, nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).....68

Figura 23. pH em CaCl₂ aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e acidez trocável aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).....70

Figura 24. Teor de enxofre aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de enxofre acumulado na faixa de aplicação aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).....72

Figura 25. Teores de potássio trocável 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de potássio trocável acumulado na faixa de aplicação aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio no Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO - 2000 Kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).....73

Figura 26. Densidade de raiz fina no perfil de solo aos 6 (a), 18 (b) e 33 (c) meses e quantidade acumulada de raiz fina em área total aos 6 (d), 18 (e) e 30 (f) meses pós-plantio no Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 Kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$).....78

Figura 27. Teor de água no solo aos 6 (a), 18 (b) e 33 (c) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$).....79

Figura 28. Altura do tronco (a) e diâmetro à altura do peito (DAP) (b) de árvores de *E. urophylla*, nos tratamentos CONTROLE - Controle sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. As barras verticais indicam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,10$).....81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores anuais do balanço hídrico climatológico pelo método proposto por Thornthwaite e Mather (1948) para o local do experimento, durante o período de condução do estudo.....	23
Tabela 2. Características físicas e químicas do solo na área experimental até 100 cm de profundidade.....	23
Tabela 3. Descrição da fertilização de base e cobertura utilizada nos tratamentos do primeiro experimento.....	24
Tabela 4. Descrição da fertilização de base e cobertura utilizada nos tratamentos do segundo experimento.....	24
Tabela 5. Descrição da fertilização de base e cobertura utilizada nos tratamentos do terceiro experimento.....	25
Tabela 6. Teores de CaO, MgO, S, RE (Reatividade) e PRNT (Poder relativo de neutralização total) nas fontes de cálcio fornecidos pelo fabricante.....	26
Tabela 7. Acúmulo de Ca, Mg e S nos compartimentos aéreos das árvores de eucalipto nos tratamentos.....	40
Tabela 8. Balanço nutricional de cálcio nos tratamentos fontes de cálcio na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.....	41
Tabela 9. Balanço nutricional de magnésio nos tratamentos fontes de cálcio na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.....	41
Tabela 10. Balanço nutricional de enxofre nos tratamentos fontes de cálcio na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.....	41
Tabela 11. Análise foliar de <i>Eucalyptus urophylla</i> aos 6, 18 e 30 meses pós-plantio nos tratamentos.....	42
Tabela 12. Volume do tronco com casca dos povoamentos clonais de <i>E. urophylla</i> em função da idade nos tratamentos.....	47
Tabela 13. Biomassa aérea e densidade do tronco de <i>E. urophylla</i> aos 30 meses nos tratamentos.....	48
Tabela 14. Acúmulo de Ca, Mg e S nos compartimentos aéreos das árvores de eucalipto nos tratamentos localização e incorporação de calcário dolomítico.....	58
Tabela 15. Balanço nutricional de cálcio nos tratamentos localização e incorporação de cálcio na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.....	59
Tabela 16. Balanço nutricional de magnésio nos tratamentos localização e incorporação de cálcio na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.....	59
Tabela 17. Análise foliar de <i>Eucalyptus urophylla</i> aos 6, 18 e 30 meses pós-plantio nos tratamentos localização e incorporação de calcário dolomítico.....	60
Tabela 18. Volume do tronco com casca dos povoamentos clonais de <i>E. urophylla</i> em função da idade nos tratamentos localização e incorporação de calcário dolomítico.....	64

Tabela 19. Biomassa aérea e densidade do tronco de <i>E. urophylla</i> aos 30 meses nos tratamentos localização e incorporação de calcário dolomítico.....	65
Tabela 20. Acúmulo de Ca, Mg e S nos compartimentos aéreos das árvores de eucalipto nos tratamentos.....	74
Tabela 21 Balanço nutricional de cálcio nos tratamentos com gessagem na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.....	74
Tabela 22 Balanço nutricional de magnésio nos tratamentos com gessagem na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.....	75
Tabela 23 Balanço nutricional de enxofre nos tratamentos com gessagem na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.....	75
Tabela 24 Análise foliar de <i>Eucalyptus urophylla</i> aos 6, 18 e 30 meses pós-plantio nos tratamentos.....	77
Tabela 25 Volume do tronco com casca dos povoamentos clonais de <i>E. urophylla</i> em função da idade nos tratamentos com dose de gesso.....	82
Tabela 26 Biomassa aérea e densidade de tronco de <i>Eucalyptus urophylla</i> aos 30 meses nos tratamentos com gessagem.....	82

1. INTRODUÇÃO

Em 2015, as plantações florestais no Brasil para fins industriais totalizaram cerca de 7,8 milhões de hectares, sendo que os plantios de eucalipto ocupavam 5,6 milhões de hectares, o que representa 71,8 % da área total florestal plantada, localizadas principalmente nos estados de Minas Gerais (24%) e São Paulo (17%) (IBÁ, 2016). Nestes estados o reflorestamento de eucalipto geralmente ocupa áreas com solos ácidos e pobres em bases trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+), as quais são essenciais para seu crescimento e desenvolvimento. Em decorrência do caráter distrófico dos solos e da contínua extração de nutrientes pelas árvores, encontram-se significativas respostas à fertilização em plantações de eucalipto no Brasil, a qual promove a garantia de produtividade sustentável em longo prazo (GONÇALVES et al., 2013). Além das condições ambientais, a magnitude das respostas à fertilização, também estão sujeitas ao ritmo de crescimento das plantas e à disponibilidade de nutrientes do solo, sendo a reposta ao Ca^{2+} relatada ocasionalmente, especialmente em solos arenosos e com deficiência hídrica (GONÇALVES et al., 2013).

Alguns mecanismos adaptativos desenvolvidos pelas plantas ocorrem em função do papel dos nutrientes (Ex. cálcio, magnésio e enxofre). Em solos tropicais, a deficiência de Ca^{2+} limita o alongamento dos pelos absorventes da zona de diferenciação radicular e das células da coifa (MARSCHNER, 2012). Entre as principais funções deste macronutriente encontra-se conferir estabilidade da parede celular, formação de novas células, servir de intermediário secundário nas respostas das plantas a vários tipos de estímulos externos, e fazer o balanço de ânions orgânicos e inorgânicos no vacúolo (TAIZ; ZEIGER, 2010). O Mg^{2+} é constituinte do núcleo do anel porfirínico da molécula de clorofila, e também está ligado à modulação da enzima rubisco, a qual catalisa a reação de fixação de carbono e a regulação da enzima frutose 1-6 bifosfatase, que controla a partição da síntese de amido. O S é constituinte de três aminoácidos essenciais (cistina, cisteína e metionina) que são a base das proteínas e que perfazem mais de 90% deste macronutriente na planta (TAIZ; ZEIGER, 2010; MARSCHNER, 2012). O enxofre é absorvido da solução do solo como SO_4^{2-} e sua deficiência ocorre, frequentemente, em solos arenosos, ocasionando redução na condutividade hidráulica radicular, na abertura estomática e na taxa fotossintética (ALVAREZ et al., 2007; MARSCHNER, 2012).

Nas plantações de eucalipto, o objetivo principal da calagem é fornecer Ca^{2+} e Mg^{2+} , com o fim de obter maiores produtividades e evitar a exaustão do Ca^{2+} no solo, devida à alta exportação na colheita (SMETHURST, 2009; RODRIGUEZ et al., 2016). No entanto, seu efeito fica restrito à camada superficial devido à baixa solubilidade das espécies químicas

neutralizantes (CaCO_3 e MgCO_3) (VITTI et al., 2008; RAIJ, 2013). Alguns estudos avaliaram a resposta no crescimento do eucalipto à calagem em tipos de solo e clima, encontrando-se aumento na produção da parte aérea e nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas camadas superficiais do solo (ROCHA et al., 2008; RODRIGUEZ et al., 2016). Com a adoção do sistema de cultivo mínimo na área florestal, a aplicação de calcário em plantios de eucalipto no Brasil é feita, na maioria dos casos, na superfície do solo, em área total ou em faixa e sem incorporação (GONÇALVES et al., 2010).

O fosfogesso ou gesso agrícola é um subproduto da reação do ácido sulfúrico em meio aquoso com a apatita, que está presente em rochas fosfatadas, com o objetivo de produzir ácido fosfórico. Desta forma, além da liberação de fósforo na forma iônica para a solução, libera cálcio, o qual se associa ao sulfato livre gerando sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (RAIJ, 2013; VITTI et al., 2008; SILVA; GIULIETTI, 2010). O gesso agrícola apresenta maior solubilidade e mobilidade no solo quando comparado ao calcário, conferindo maior possibilidade de se movimentar verticalmente no perfil do solo. A solubilização do gesso, em geral, é rápida, devido a imediata dissociação em íons Ca^{+2} e SO_4^{2-} , os quais participam de trocas catiônicas e aniônicas, respectivamente, enquanto o CaSO_4^0 , móvel no perfil do solo, contribui para o movimento de pares iônicos (CaSO_4^0 , MgSO_4^0 e KSO_4^-) em direção ao subsolo (VITTI et al., 2008; RAIJ, 2013). A aplicação de gesso não altera o pH do solo, pois apresenta o íon sulfato derivado do ácido sulfúrico (H_2SO_4), um ácido forte que permanece dissociado, não havendo neutralização do H^+ (ALVAREZ et al., 1999; VITTI et al., 2008).

Efeitos positivos do gesso, observados nas mais variadas condições de solo e clima, são indicativos de que seu emprego favorece o crescimento radicular pela movimentação de Ca^{2+} e SO_4^{2-} no perfil do solo (TAKASU, 2006; SILVA; GIULIETTI, 2010; RAMOS et al., 2013). Resultados obtidos por RODRIGUEZ et al. (2016) indicam que o eucalipto responde positivamente à aplicação de calcário consorciado com o gesso agrícola, especialmente em solos que apresentam teores de Ca^{2+} trocável próximo de zero.

Portanto, o gesso pode ser utilizado como fonte de Ca^{2+} e SO_4^{2-} e como condicionador químico de subsuperfície, diminuindo a atividade do íon Al^{3+} na solução de solo pelo aumento do Ca^{2+} na CTC efetiva ao longo do perfil (RAIJ, 2013; VITTI et al., 2008). No entanto, a presença de Al^{3+} na camada subsuperficial em solos sob plantações de eucalipto são baixas, pois a espécie apresenta bom desenvolvimento radicular (GONÇALVES et al., 2008), em decorrência da formação de quelatos, com ácidos orgânicos e huminas, que atuam formando complexos estáveis não tóxicos com o Al^{3+} (KOCHIAN et al., 2002; BRADY; WEIL, 2013;).

Existem diversas recomendações para a aplicação de gesso agrícola, dependendo do objetivo a ser alcançado com o uso deste produto. Encontram-se sugestões com base na textura do solo, com base na determinação de fósforo remanescente ou pelo método de saturação por bases (ALVAREZ et al., 1999). Como as plantações estabelecidas na região do cerrado apresentam baixa disponibilidade de Ca^{2+} recomenda-se observar se as camadas subsuperficiais do solo (20 a 40 ou 30 a 60 cm) apresentam teor de Ca^{2+} menor que $4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (ALVAREZ et al., 1999; VITTI, 2008, IPEF, 2015).

Frequentemente, se questiona sobre a sustentabilidade da produção de florestas plantadas, em curto e longo prazo, tendo em vista que a maioria das plantações de eucalipto no Brasil estão estabelecidas em regiões adversas, com secas sazonais e com déficit hídrico pronunciado (ALVARES et al., 2013; GONÇALVES et al., 2013), sendo que este é considerado o maior limitador para sua produção (STAPE et al., 2004). Uma maior produtividade deve ser consequência de maior aquisição de recursos do ambiente pelas plantas e, ou, da utilização mais eficiente dos mesmos (BARROS et al., 1990), de forma a maximizar os investimentos, justificando investigar o sistema de aquisição de água e nutrientes do solo, representado principalmente pelas raízes finas.

Com o objetivo de utilizar eficientemente água e nutrientes, quando são limitantes, o eucalipto apresenta uma série de mecanismos adaptativos como desenvolvimento de um rápido e profundo sistema radicular para melhorar a eficiência absorptiva nas camadas mais profundas do solo (BOUILLET et al., 2002; LACLAU et al., 2013; CHRISTINA et al., 2011). A absorção de água e nutrientes em solos com deficiência hídrica é restrita à zona de absorção das raízes novas, localizada atrás da coifa. Esta zona de absorção geralmente tem um período efetivo muito curto, dado o rápido processo de suberização deste segmento radicular e, também, porque ao redor da raiz forma-se uma zona de depleção de nutrientes que inviabiliza a absorção de nutrientes. Por outro lado, a distribuição de raízes no perfil do solo possui controle genético, embora a configuração radicular das árvores possa ser resultante da interação do genótipo com outros fatores tais como a umidade do solo, profundidade efetiva, textura, estrutura, método de preparo de solo entre outros (GONÇALVES; MELLO, 2004; FLORENCE, 2007).

Destaca-se que a grande maioria dos estudos realizados sobre a utilização de calagem e gessagem nos rendimentos das plantas foram feitos com culturas agrícolas, sendo escassos os estudos realizados para avaliar seus efeitos em eucalipto. Adicionalmente, apesar de boa parte dos mecanismos que envolvem a dinâmica do gesso no solo ser conhecida, existem ainda dúvidas quanto aos critérios a serem utilizados para sua recomendação. Combinações de calcário

e gesso parecem resultar em maiores produções do que a aplicação de cada um desses dois materiais separadamente (RODRIGUEZ et al., 2016).

Foram propostas as seguintes hipóteses:

- A aplicação de gesso agrícola promove incrementos dos teores de Ca^{2+} e SO_4^{-2} na subsuperfície do solo, aumentando o crescimento de povoamento do eucalipto quando comparado às outras fontes de cálcio, em decorrência de um maior crescimento radicular na subsuperfície.

- A aplicação do calcário dolomítico em faixa proporciona crescimento superior do eucalipto quando comparado a outras formas de aplicação.

- A maior dose de gesso combinado com a aplicação do calcário dolomítico aumenta os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e SO_4^{-2} tanto na superfície como na subsuperfície do solo, promovendo maior crescimento aéreo e radicular no eucalipto.

O objetivo geral do presente estudo foi avaliar o crescimento da parte aérea e radicular do eucalipto em resposta a fontes e métodos de aplicação de cálcio em um Neossolo Quartzarênico, na região de Santa Rosa de Viterbo - SP.

Os objetivos específicos foram avaliar a resposta do eucalipto ao efeito da forma da aplicação e da incorporação de calcário dolomítico; avaliar os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e SO_4^{-2} no solo e seus efeitos sobre a distribuição das raízes finas em resposta a aplicação das fontes de cálcio.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área experimental

O experimento foi instalado em setembro de 2013 no município de Santa Rosa de Viterbo - SP (21° 58'S, 47° 42'W), em uma fazenda pertencente à empresa International Paper e localizada a 686 m acima do nível do mar. Pela classificação de Köppen, o clima da região é Cwa, com temperatura média anual de 20 °C, sendo 16,7 °C a média do mês mais frio (julho) e 22,8 °C a média do mês mais quente (fevereiro) (ALVARES et al., 2013). A precipitação pluvial média anual é de 1450 mm (Figura 1).

As condições climáticas registradas no ano 2014 foram atípicas comparadas à média histórica local. A precipitação pluvial registrada foi de 964 mm, 30% abaixo do esperado (Figura 2). Entre 04/14 e 09/14 a precipitação pluvial foi 140 mm. O balanço hídrico sequencial feito para o período de condução do experimento, 09/2013 a 09/2016, apresentou um déficit hídrico acentuado entre os meses de maio a outubro, no entanto, em 2014, o déficit hídrico iniciou em janeiro e se estendeu até outubro, inclusive para os primeiros meses do ano de 2015 (Tabela 1). O ano 2016 foi um ano atípico com um incremento no volume de precipitação pluvial nos primeiros meses. Entre o 01/16 e 03/16 foi registrada uma precipitação pluvial de 783 mm (Figura 3).

Figura 1. Distribuição anual da precipitação pluvial e média mensal da temperatura do município de Santa Rosa de Viterbo - SP. Dados obtidos da série histórica do período de 1950 a 2010.

Figura 2. Precipitação pluvial acumulada registrada pela estação meteorológica pertencente à empresa International Paper, distante a 18 km da área experimental, no período de setembro de 2013 a setembro de 2016.

Figura 3. Balanço hídrico da área do experimento durante o período de estudo, segundo metodologia de Thornthwaite e Mather (1955). Capacidade de água disponível (CAD) = 60 mm.

Tabela 1. Valores anuais do balanço hídrico climatológico pelo método proposto por Thornthwaite e Mather (1955) para o local do experimento, durante o período de condução do estudo.

Ano	Temperatura	PP ⁽¹⁾	ETP ⁽²⁾	ETR ⁽³⁾	EXC ⁽⁴⁾	DEF ⁽⁵⁾
	Média					
	°C			mm		
2014	23,5	964	1255	840	123	415
2015	22,9	1294	1190	998	295	192
2016*	23,1	1221	875	800	460	74

⁽¹⁾Precipitação anual; ⁽²⁾Evapotranspiração potencial calculada segundo Thornthwaite (1955); ⁽³⁾Evapotranspiração real; ⁽⁴⁾Soma do excedente hídrico no ano; ⁽⁵⁾Soma do déficit hídrico no ano *até 09/16

O relevo local é plano e o solo foi classificado como Neossolo Quartzarênico. Previamente à instalação do experimento, foram coletadas 15 amostras compostas de solo (10:1) até 100 cm de profundidade, de forma sistemática distribuídos pela área experimental (2,34 ha), para a caracterização física e química do solo (Tabela 1), conforme metodologia descrita por RAIJ et al. (2001).

Tabela 2. Características físicas e químicas do solo na área experimental até 100 cm de profundidade.

Camada.	Areia	Silte	Argila	pH ⁽¹⁾	S-SO ₄ ²⁻ (2)	Ca ⁽³⁾	Mg ⁽³⁾	K ⁽³⁾	Al ⁽⁴⁾	H + Al ⁽⁵⁾	SB	CTC	V	m
cm	g kg ⁻¹				mg dm ⁻³					mmolc.dm ⁻³			%	
0 - 20	950	2	48	3,9	1,4	3,1	2,0	1,3	7,1	61	7	68	10	53
20 - 40	930	1	69	3,9	4,3	2,0	1,0	1,1	6,0	42	4	46	8	63
40 - 60	930	2	68	3,9	5,5	1,0	0,0	0,9	5,0	35	2	37	6	71
60 - 80	940	2	58	4,0	8,4	1,0	0,0	0,7	4,2	36	2	38	5	71
80 - 100	930	3	67	4,0	9,7	0,4	0,0	0,7	4,2	34	1	35	4	74

(1) – solução de CaCl₂ em 0,01 mol L⁻¹ (1:2,5); (2) solução de BaCl₂ em pó; (3) – resina trocadora de íons; (4) – solução de KCl (1 mol L⁻¹); (5) Tampão SMP; SB – Soma de Bases; CTC – Capacidade de Troca Cationica; V – Saturação de Bases; m – Saturação em alumínio

2.2. Desenho experimental e tratamentos

Na área experimental foi feita a colheita de um povoamento clonal de *E. urophylla* em março de 2013. Cinco meses após o corte, o solo foi preparado com subsolador a 40 centímetros de profundidade. Foram instalados três experimentos em setembro de 2013 em delineamento de blocos ao acaso. No primeiro experimento foram avaliadas as fontes de cálcio (Tabela 3) com quatro tratamentos e quatro repetições, totalizando 16 parcelas experimentais. Cada

parcela foi composta de 81 plantas distribuídas em nove linhas com nove plantas cada, em espaçamento de 3,0 m x 3,0 m. A coleta de dados dendrométricos, nutricionais e edáficos foram feitas em 25 plantas no centro da parcela, respeitando uma bordadura dupla.

Tabela 3. Descrição da fertilização de base e de cobertura utilizada nos tratamentos do primeiro experimento

Descrição dos tratamentos		Fertilização de base							1ª fertilização de cobertura				2ª fertilização cobertura	
		N	K ₂ O	P ₂ O ₅	FTE	CaO	MgO	S	N	K ₂ O	S	B	K ₂ O	B
		Kg ha ⁻¹												
CONTROLE	Sem fonte de cálcio	10	10	60	20	-	50	-	50	50	60	1,7	90	3,3
DOL	Calcário dolomítico em faixa *	10	10	60	20	620	240	12	50	50	60	1,7	90	3,3
CAL	Calcário calcinado em faixa*	10	10	60	20	620	200	12	50	50	60	1,7	90	3,3
GESSO	Gesso agrícola em faixa*	10	10	60	20	300	-	177	50	50	60	1,7	90	3,3

*nos tratamentos foi aplicado o fertilizante em faixa de 1,0 m de largura na linha do plantio

No segundo experimento foram avaliados os efeitos de localização e incorporação com a aplicação de calcário dolomítico (Tabela 4). Totalizando quatro tratamentos e quatro repetições, em 16 parcelas experimentais. Cada parcela tinha a mesma quantidade de plantas do primeiro experimento.

Tabela 4. Descrição da fertilização de base e de cobertura utilizada nos tratamentos do segundo experimento

Descrição dos tratamentos		Fertilização de base							1ª fertilização de cobertura				2ª fertilização cobertura	
		N	K ₂ O	P ₂ O ₅	FTE	CaO	MgO	S	N	K ₂ O	S	B	K ₂ O	B
		Kg ha ⁻¹												
CONTROLE	Sem fonte de cálcio	10	10	60	20	-	50	-	50	50	60	1,7	90	3,3
DOL AT	Calcário dolomítico em área total	10	10	60	20	620	240	12	50	50	60	1,7	90	3,3
DOL	Calcário dolomítico em faixa	10	10	60	20	620	240	12	50	50	60	1,7	90	3,3
DOL INC	Calcário dolomítico em faixa* e incorporado	10	10	60	20	620	240	12	50	50	60	1,7	90	3,3

*nos tratamentos DOL e DOL INC foi aplicado o fertilizante em faixa de 1,0 m de largura na linha do plantio

No terceiro experimento foram avaliados os efeitos da calagem e gessagem (Tabela 5) em quatro tratamentos e quatro repetições, totalizando 16 parcelas experimentais. Cada parcela tinha a mesma quantidade de plantas do primeiro experimento.

Tabela 5. Descrição da fertilização de base e de cobertura utilizada nos tratamentos do terceiro experimento

Descrição dos tratamentos		Fertilização de base							1ª fertilização de cobertura				2ª fertilização cobertura	
		N	K ₂ O	P ₂ O ₅	FTE	CaO	MgO	S	N	K ₂ O	S	B	K ₂ O	B
		Kg ha ⁻¹												
CONTROLE	Sem fonte de cálcio	10	10	60	20	-	50	-	50	50	60	1,7	90	3,3
GESSO	Gesso agrícola em faixa*	10	10	60	20	300	-	177	50	50	60	1,7	90	3,3
DOL+GESSO	Calcário dolomítico com gesso agrícola em faixa*	10	10	60	20	903	240	177	50	50	60	1,7	90	3,3
DOL+2GESSO	Calcário dolomítico com o dobro da dose de gesso agrícola em faixa*	10	10	60	20	1165	240	341	50	50	60	1,7	90	3,3

*nos tratamentos DOL e DOL INC foi aplicado o fertilizante em faixa de 1,0 m de largura na linha do plantio

A fertilização de base foi aplicada após o plantio. As fontes de cada fertilizante foram: N via sulfato de amônio (20% de N e 24% de S); P₂O₅ via superfosfato triplo (41% de P₂O₅); K₂O via cloreto de potássio (60% de K₂O); FTE “frited trace element” (1,8% de B; 0,8% de Cu; 2,0% de Mn; 0,1% de Mo e 9,0% de Zn). A primeira fertilização de cobertura foi aplicada 90 dias após plantio e a segunda de cobertura 300 dias após plantio. As fontes dos fertilizantes aplicados foram S via sulfato de amônio e B via Agramix (10% B).

Foram fornecidos 2000 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico, 1200 kg ha⁻¹ de calcário calcinado e 1200 kg ha⁻¹ de gesso agrícola. O critério para recomendação da dose de calcário dolomítico e calcinado foi baseado na quantidade de CaO recomendada em cada tratamento e nas garantias destas fontes de cálcio (Tabela 6). A dose de gesso (G) foi calculada pela análise química de amostras de solo coletadas em camadas superficiais e subsuperficiais. Usou-se a seguinte fórmula (IPEF, 2015):

$$G \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}: \frac{(4 - \text{Cas}) \times 20 \times \text{Profundidade (cm)} \times 10}{\text{Cag}}$$

Em que:

G = Dose de gesso a ser aplicada em kg ha⁻¹;

4 = Teor desejado de Ca²⁺ em mmol_c dm⁻³ de solo;

Cas = Teor de Ca²⁺ em mmol_c dm⁻³ na camada 20 – 40 cm do solo;

20 = Massa de Ca²⁺ em kg ha⁻¹ necessária para aumentar em 1 mmol_c dm⁻³ cada 1 dm³ de solo;

10 = Fator de conversão do percentual de cálcio no gesso para a quantidade em mmol_c dm⁻³ de Ca²⁺, considerando que uma tonelada de gesso eleva o teor em uma camada de 50 cm de solo;

Cag = Percentual do Ca²⁺ no gesso.

Tabela 6. Teores de CaO, MgO, S, RE (Reatividade) e PRNT (Poder relativo de neutralização total) nas fontes de cálcio fornecidos pelo fabricante

Fertilizante	Garantia				
	CaO	MgO	S	RE	PRNT
			%		
Calcário Dolomítico	30	12	-	82	70
Calcário Calcinado	48	16	-	100	124
Gesso	24	-	14	-	-

2.3. Avaliações

2.3.1. Análise química do solo

Primeiramente, foi realizada a análise química do solo antes da instalação do experimento para fins de caracterização da área de estudo. Posteriormente, a fertilidade do solo foi determinada aos 6, 18 e 36 meses após o plantio em todos os tratamentos. Foram coletadas amostras simples na linha do plantio distantes 100 cm do tronco sobre a linha do plantio. Foram selecionadas 4 árvores por tratamento em um transecto diagonal na área útil da parcela. Aos 6 meses pós-plantio, a amostragem foi feita nas camadas: 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm. Aos 18 e os 36 meses, as amostragens, foram realizadas também nas profundidades: 100-120, 120-140, 140-160 cm, nas quatro parcelas de todos os tratamentos. Foram coletadas quatro amostras simples de solo por parcela com trado holandês para formar uma amostra composta. As mesmas foram passadas em peneiras de 2 mm e colocadas para secar em estufa a 40 °C até atingir peso constante. No Laboratório de Fertilidade de Solo da

ESALQ foram analisados: pH em CaCl_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} e Al^{3+} segundo a metodologia de RAIJ et al. (2001).

Os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e SO_4^{2-} em $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ foram convertidos a $\text{mmol}_c \text{m}^{-2}$ em cada uma das camadas amostradas, com o fim de determinar a quantidade acumulada de cada nutriente ao longo de perfil de solo.

2.3.2. Balanço nutricional

Foi feito o balanço nutricional de cálcio, magnésio e enxofre em cada um dos experimentos. As entradas foram a quantidade do nutriente aplicada via fertilizante e a deposição atmosférica segundo LACLAU et al. (2010). As saídas foram a quantidade de nutriente encontrada na parte aérea mais a calculada segundo MELLO (2004) na parte radicular. Foi calculado a percentagem de nutriente assimilado pela seguinte fórmula:

$$\text{Quantidade de nutriente assimilado: } \frac{\text{Quantidade do nutriente estocado}}{\text{Entrada do nutriente} + \text{quantidade original no solo}} \times 100$$

2.3.3. Avaliação de raízes finas e umidade do solo

As raízes finas foram amostradas em todos os tratamentos com exceção do DOL AT, aos 10, 18 e 33 meses, em três parcelas. Em cada parcela foram selecionadas cinco árvores com CAP médio. A amostragem de solo para coleta de raiz fina foi realizada nas camadas: 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100, 100-120, 120-140, 140-160 cm, utilizando o trado tipo sonda de 4,5 cm de diâmetro interno. Para a seleção do ponto de amostragem em cada árvore, se fez um sorteio entre 6 posições possíveis (3 na linha ou 3 na entrelinha). Antes de passar a seguinte árvore o ponto selecionado anteriormente era excluído para evitar a repetição do ponto. Este método é chamado de diagrama de Voronoi (Figura 4). As amostras foram guardadas no freezer do laboratório. Sequencialmente, em cada amostra, foram separadas as raízes finas vivas utilizando um jogo de duas peneiras de malha de 2,0 e 1,0 mm. As raízes foram pesadas e colocadas para secar em estufa a 65 °C até atingir massa constante. Para estimar a densidade radicular por biomassa utilizando o volume de solo de cada camada amostrada.

A densidade de raízes finas em g dm^{-3} em cada tratamento foi convertida em g m^{-2} em cada uma das camadas testadas para o cálculo da quantidade acumulada de raízes finas em cada tratamento.

Figura 4. Método de coleta de solo na linha (cor cinza) e na entrelinha (cor branca) de plantio para análise de raízes finas. Representação das posições onde foram coletadas as amostras de solo.

A umidade do solo foi determinada nas mesmas amostras da coleta de solo para análise de raízes finas. No laboratório foram pesadas 10 gramas de solo de cada profundidade e secado na estufa por 72 horas a uma temperatura de 105 °C até atingir massa constante, para logo serem mensuradas novamente (CHRISTINA et al., 2011).

2.3.4. Inventários e biometrias

O crescimento das árvores foi avaliado aos 6, 11, 20, 30 e 38 meses após o plantio por meio da mensuração da circunferência à altura do peito (CAP) com fita métrica e da altura total (H) com ajuda de régua milimetrada e hipsômetro (modelo Vertex III). Posteriormente, os dados de CAP foram transformados em DAP (CAP/π).

Aos 30 meses pós-plantio foram abatidas três árvores por tratamento na classe diamétrica média para determinação da biomassa dos compartimentos aéreos. O volume de madeira foi calculado pela cubagem rigorosa com diâmetros medidos a cada metro. O método de cubagem rigorosa utilizado foi o de Smalian (SCOLFORO; THIERSCH, 2004). As árvores abatidas foram separadas em lenho, casca, galhos e folhas e sua massa fresca foi medida em campo com uma balança digital (0,01 kg de precisão) com capacidade de 100 kg. Foram retiradas sub-amostras de cada um dos componentes da parte aérea, pesadas em uma balança digital com capacidade de 4,2 kg e posteriormente levadas ao laboratório. No laboratório, as amostras foram colocadas em estufa de circulação forçada de ar (65 °C) até atingirem massa constante e tiveram sua massa seca pesada. Posteriormente, foi calculada a umidade das amostras para extrapolação e estimação da biomassa seca de cada árvore. Para o cálculo da biomassa seca dos compartimentos, as amostras foram secas em estufa a 65 °C até atingir massa

constante, para mensuração da sua massa seca. As amostras foram moídas e enviadas para o Laboratório de Ecologia Aplicada (LEA) da ESALQ para análise nutricional.

Após a digestão nítrico perclórica, foi feita a determinação de S por colorimetria, do K por fotometria de chama e do Ca e do Mg por absorção atômica (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1989).

2.3.5. Análise química foliar

As amostragens de folhas foram feitas aos 6, 18 e 30 meses após o plantio em todos os tratamentos. Foram coletadas 16 folhas recém-maduras em árvores com DAP médio, sendo quatro folhas por quadrante (N, S, L e O), entre a terceira e a quinta inserção a partir da ponta do galho do terço superior da copa, sem competição de luz, em três blocos em 5 plantas por tratamento (BELLOTE; SILVA 2000). As análises foram realizadas conforme descrito no item 2.4.5.

2.4. Índice de uniformidade – PV 50 (%)

A uniformidade dos tratamentos foi avaliada por meio do Índice de uniformidade PV 50 (HAKAMADA, 2012). A equação detalha o cálculo do PV50:

$$PV50 = \frac{\sum_{k=1}^{n/2} \text{Volume individual } ij}{\sum_{k=1}^n \text{Volume individual } ij}$$

Sendo:

PV50= Porcentagem volumétrica das 50% menores árvores plantadas;

Volume Individual: Volume individual do tratamento i na idade j;

n: número de árvores plantadas ordenadas, da menor para a maior

2.5. Análise Estatística

Os resultados foram verificados quanto à presença de outliers, normalidade e homogeneidade de variância. Os dados foram submetidos à análise de variância por meio do teste F. Quando foi significativo, a comparação de médias foi realizada por meio do teste LSD ($\alpha = 0,05$). Os resultados foram processados com o software estatístico SAS 9.3 (SAS Institute Cary, NC, USA) e os gráficos feitos no software SIGMAPLOT 10.0 (Software Inc, San Diego, CA, USA).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Experimento 1 - Respostas às fontes de cálcio

3.1.1. Fertilidade do solo

O teor de Ca^{2+} trocável aumentou ao longo do perfil de solo com a aplicação de calcário dolomítico e calcário calcinado aos 6 meses pós-plantio (Figura 5a). Aos 6 meses os teores de Ca^{2+} foram médios para plantações de eucalipto (GONÇALVES, 2010). Na camada 0 – 40 cm, para o DOL e, 0 – 30 cm, para o CAL, os teores de Ca^{2+} foram superiores a $4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 5a). Nesta idade houve déficit hídrico anual de 66 mm (Figura 3) e baixa disponibilidade de água no solo (3%) (Figura 11). A precipitação pluvial em 2014 foi 25 % abaixo da média histórica do município. Provavelmente, essas condições influenciaram a baixa solubilidade dos calcários (CAIRES, 2000).

Aos 18 meses pós-plantio, os teores de Ca^{2+} foram altos para o plantio de eucalipto (GONÇALVES, 2010). Nesta idade, o CAL apresentou teores médios de $14 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0 – 30 e, no DOL, teores médios de $11,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0 – 20 cm (Figura 5b). A maior solubilidade do CAL foi devido a menor granulometria do corretivo e à sua composição química (BELLENGIERI et al., 1992). A solubilidade dos constituintes neutralizantes e a velocidade de reação dos calcários são proporcionais ao PRNT (SOUSA et al., 2007). Calcários com maior granulometria apresentam maiores efeitos residuais (BELLENGIERI et al., 1992).

Aos 36 meses pós-plantio, o DOL apresentou maiores teores de Ca^{2+} trocável ao longo do perfil do solo. Houve dois picos, o primeiro na camada 0 – 20 cm, com teores médios de $14,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e, o segundo, na camada de 60 – 100 cm, com teores médios de $14,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 5c). Cabe salientar, que os teores de Ca^{2+} na superfície no CAL aos 18 meses e, do DOL, aos 36 meses, têm alta relação com o valor do PRNT desses corretivos (CAL: 124% e DOL: 70%).

Figura 5. Teores de cálcio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de cálcio trocável acumulada na faixa de aplicação das fontes de cálcio aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha^{-1} de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha^{-1} de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha^{-1} de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$)

A aplicação de gesso aumentou os teores de Ca^{2+} trocável em todas as camadas aos 6 meses pós-plantio (Figura 5a). Na camada 0 – 10 cm, houve um valor médio de $5,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 5a). Aos 18 meses, somente na camada 0 – 10 cm o teor de Ca^{2+} foi maior em relação ao CONTROLE (Figura 5b), com um teor considerado baixo. Dezoito meses depois, os teores foram maiores até a profundidade de 60 cm, com teores mais expressivos na camada 20 – 40 cm (Figura 5c). Em termos comparativos, neste estudo, a gessagem forneceu aproximadamente a metade da quantidade de CaO (300 kg ha^{-1}) aplicada nos tratamentos que receberam calcário (620 kg ha^{-1}).

Na subsuperfície, os teores de Ca^{2+} foram considerados baixos para o eucalipto (GONÇALVES, 2010). Aos 6 meses pós-plantio, o tratamento DOL foi o que apresentou a maior quantidade de Ca^{2+} acumulado (Figura 5d). Doze meses depois, no tratamento CAL foi encontrado a maior quantidade de Ca^{2+} acumulada, e quantidade acumulada similar ao DOL, entre 40 e 160 cm de profundidade (Figura 5e). No tratamento GESSO, 6 meses pós-plantio, abaixo da profundidade de 40 cm, houve maior migração de Ca^{2+} comparado com o DOL e CAL (Figura 5d). Aos 18 meses, os teores de Ca^{2+} foram similares ao CONTROLE (Figura 5e) e, aos 36 meses, abaixo da profundidade 60 cm, os teores foram similares ou inferiores ao CONTROLE (Figura 5f). No DOL, a lixiviação de Ca^{2+} é maior devido à grande formação de par iônico na forma de CaCO_3^0 em pH maior que 5,0 (CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$), o qual se dissocia em camadas subsuperficiais do solo (CAIRES et al., 2000, SOUSA et al., 2007). A migração dos pares iônicos é favorecida pela natureza arenosa do solo. Também é provável que tenha ocorrido o deslocamento físico das partículas de calcário através de canais formados por raízes mortas (PAVAN, 1994).

No DOL o teor de Mg^{2+} aumentou nas três épocas de coleta, em todas as profundidades, exceto aos 18 meses na camada 120 - 160 cm. Aos 6 meses pós-plantio, houve aumento na camada 10 – 60 cm, mas o teor de Mg^{2+} ainda permaneceu baixo, menor do que $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 6a). Nos tratamentos CAL e GESSO, os valores foram similares ou menores do que o CONTROLE. Aos 18 meses pós-plantio, houve aumentos mais expressivos no tratamento DOL (Figura 6b). Aos 36 meses pós-plantio o DOL apresentou o maior teor acumulado de Mg^{2+} acumulado (Figura 6e). Na camada 0 – 20 cm, apresentou teores médios de $8,8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e, na camada 60 – 100 cm, os teores médios de $8,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 6c). O CAL apresentou um teor de $7,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada 0 - 10 cm, decrescendo ao longo do perfil de solo.

Figura 6. Teores de magnésio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de magnésio trocável acumulada na faixa de aplicação das fontes de cálcio aos 6 (d), 18 (d) e 36 (e) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

Nas três épocas de amostragem e em todas as profundidades, a aplicação de calcário dolomítico promoveu aumentos no pH, exceto aos 18 e 36 meses pós-plantio, na camada 140 – 160 cm (Figura 7). Na camada 0 – 20 cm foram encontrados aumentos mais expressivos, sendo, aos 6 meses, um valor médio de 4,8 (Figura 7a), aos 18 meses, 5,1 (Figura 7b) e, aos 36 meses, 4,7 (Figura 7c). Com o aumento de profundidade, o pH diminuiu em todas as épocas de amostragem, exceto aos 36 meses, em que o DOL apresentou pequeno aumento entre 60 e 100 cm de profundidade, com um valor médio de 4,7 (Figura 7c). A aplicação de calcário calcinado resultou em pequena elevação de pH aos 6 meses até a profundidade de 60 cm (Figura 7a), e maior elevação aos 18 meses até a profundidade de 30 cm, com valores médios de 4,9 (Figura 7b). Na subsuperfície, similar ao comportamento com o calcário dolomítico, no CAL, o pH diminuiu.

A gessagem não influenciou o pH nem a acidez trocável do solo nas profundidades e datas de amostragem (Figura 7). Este comportamento foi similar ao relatado por TAKASU et al. (2006) em Andosolo em cultura agrícola e, por CAIRES et al. (2011), em Latossolo Vermelho, cultivado em sistema de plantio direto com culturas agrícolas. O gesso não altera o pH do solo, pois apresenta a base SO_4^{2-} , derivada de ácido forte (H_2SO_4), que permanece dissociada não promovendo neutralização do H^+ (VITTI *et al.*, 2008; RAIJ, 2013; CAIRES, 2011). No entanto, alguns estudos mostraram que a aplicação do gesso aumentou o pH em camadas subsuperficiais (CAIRES, 2003; ZAMBROSI *et al.*, 2007), devido à reação de substituição do ligante na superfície das partículas do solo, envolvendo Fe e óxidos hidratados de Al. Isto ocorre porque o SO_4^{2-} desloca o OH^- e promove a neutralização parcial em solos ácidos (REEVE E SUMNNER, 1972).

Aos 6 meses pós-plantio, no DOL, o teor de Al^{3+} trocável ao longo do perfil de solo foi menor que no CONTROLE. Na camada de 0 – 20 cm, as reduções foram mais expressivas. No tratamento CAL, o teor de Al^{3+} foi similar ao CONTROLE ao longo do perfil. O GESSO, nas camadas 0 – 10 cm e 60 – 100, apresentou maiores valores de Al^{3+} do que o CONTROLE (Figura 7d). Aos 18 meses pós-plantio, nos tratamentos DOL e CAL, os teores de Al^{3+} foram similares ou menores do que o CONTROLE ao longo do perfil de solo (Figura 7e). Aos 36 meses pós-plantio, os tratamentos DOL, CAL e GESSO apresentaram teores de Al^{3+} menores ou similares ao CONTROLE ao longo do perfil, exceto para o DOL na camada 20- 30 cm.

Figura 7. pH em CaCl₂ e acidez trocável aos 6 (a e d), 18 (b e e) 36 (c e f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

Com o aumento do pH, os teores de Al^{3+} trocável no solo foram reduzidos. Na camada superficial, os ligantes orgânicos complexam o Ca^{2+} e Mg^{2+} , deslocando o Al^{3+} dos complexos orgânicos (MENDONÇA e ROWELL, 1994; ZAMBROSI et al., 2007, CAIRES, 2000). Os teores de Al^{3+} trocável apresentaram redução com o aumento da profundidade do solo, especialmente aos 18 e aos 36 meses pós-plantio. O Al^{3+} não permaneceu em solução, precipitando-se na forma de oxihidróxidos de Al (SOUSA et al 2007). Sua diminuição em teor na subsuperfície pode estar relacionada ao mecanismo de lixiviação, por meio da formação de complexos orgânicos hidrossolúveis (MIYAZAWA et el., 1996), restando os cátions básicos na solução de solo na forma trocável. A diminuição do pH aos 36 meses é devida à contínua geração de H^+ no solo, por exemplo, pela mineralização de compostos orgânicos (SOUSA et al., 2007).

Nos tratamentos DOL, CAL e GESSO, houve aumento nos teores de S-SO_4^{2-} , aos 6 meses pós-plantio na camada 0 – 40 cm, exceto para o DOL na camada 0 – 10 cm. Na subsuperfície, no tratamento GESSO, houve teores mais expressivos, especialmente na camada 60 – 80 cm (Figura 8a). Aos 18 meses pós-plantio, os tratamentos DOL e GESSO na camada 0 - 40 cm apresentaram aumentos nos teores S-SO_4^{2-} em relação ao CONTROLE. No CAL, os teores foram similares ou menores na camada 0 – 40 cm e, menores na camada 40 – 160cm. Na subsuperfície houve aumento nos tratamentos GESSO e DOL. Houve um pico na camada 80 – 100 cm, em que o GESSO apresentou um teor de $15,1 \text{ mg dm}^{-3}$ e, o DOL, $15,4 \text{ mg dm}^{-3}$ de SO_4^{2-} (Figura 8b). Na camada de 100 – 160 cm, o GESSO apresentou teores maiores em relação ao DOL (Figura 8c).

A maior competição na camada superficial do ânion H_2PO_4^- pelos sítios de adsorção fazem que o ânion S-SO_4^{2-} movimente-se para as camadas subsuperficiais, acompanhado por cátions, como a Ca^{2+} (BLUM et al., 2014). A diminuição do teor de Al^{3+} abaixo de 100 cm de profundidade pode ser explicada pela reação de precipitação do Al com o SO_4^{2-} . Entre os outros fatores que influenciam a adsorção de S no solo, estão a quantidade e o tipo das argilas e o pH.

Figura 8. Teores de enxofre aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de enxofre acumulada na faixa de aplicação das fontes de cálcio aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

Aos 36 meses, os tratamentos apresentaram menores quantidades acumuladas de S-SO_4^{2-} , em relação aos 18 meses, devido à maior absorção pelas árvores. Os maiores teores ao longo do perfil foram para o GESSO, $14,7 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada 0 – 10 cm e, $13,3 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada 140 – 160 cm. No DOL, o maior teor foi na camada 120 – 160, com teores médios de $9,8 \text{ mg dm}^{-3}$.

Os teores de K^+ trocável aos 6 meses, nos tratamentos, foram menores do que o CONTROLE ao longo do perfil do solo (Figura 9a). Os teores foram baixos, menores que $0,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Os teores observados de K^+ podem ser pelos baixos teores de água encontrados aos 6 meses no perfil de solo se devem ao déficit hídrico ocorrido nesta data (Figura 3). Doze meses depois, o teor de K^+ aumentou nos diferentes tratamentos, provavelmente pelo K^+ da serapilheira. Aos 36 meses pós-plantio, nos tratamentos GESSO e CAL, os teores de K^+ foram similares ou menores que o CONTROLE ao longo do perfil. (Figura 9c). No tratamento DOL, houve aumentos em todo o perfil, exceto na camada 0 – 10 cm. A mobilidade vertical deste nutriente foi determinada pela quantidade de água que percola no perfil e pela concentração do nutriente na solução de solo (ERNANI et al., 2007).

A movimentação de K^+ neste solo arenoso, ocorreu devido à baixa CTC e ao aumento de teor de água no solo. Provavelmente, a adição do KCl também promoveu lixiviação de Ca^{2+} , devido à formação e migração do par iônico $\text{Ca}(\text{Cl})_2^0$.

Figura 9. Teores de potássio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de potássio trocável acumulada na faixa de aplicação das fontes de cálcio aos 6 (d), 18 (d) e 36 (e) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

3.1.2. Balanço nutricional e absorção de nutrientes

Entre 69 e 75% do acúmulo de Ca foi na casca, seguido de 17% no lenho (Tabela 7). O acúmulo de Mg^{2+} foi menor comparado com o Ca^{2+} , concentrando-se nos mesmos compartimentos. Entre 50 e 56% do acúmulo de Mg na casca e 27% no lenho. O S, acumulou-se em maior quantidade no lenho seguido da casca, com valores inferiores comparados com o Ca^{2+} e o Mg^{2+} (Tabela 10).

Tabela 7. Acúmulo de Ca, Mg e S nos compartimentos aéreos das árvores de eucalipto nos tratamentos

Tratamento	Tronco		Copa		Total
	Lenho	Casca	Galho	Folha	
Ca (kg ha ⁻¹)					
CONTROLE	46,4 a	204,0 a	9,5 b	9,7 a	269,9
DOL	52,7 a	224,5 a	15,7 a	13,3 a	306,2
CAL	58,2 a	188,4 a	14,1 ab	11,1 a	271,8
GESSO	57,9 a	206,3 a	21,3 a	10,6 a	296,1
Mg (kg ha ⁻¹)					
CONTROLE	17,4 a	36,0 a	4,6 a	6,3 a	64,3
DOL	22,5 a	42,9 a	6,4 a	9,1 a	80,9
CAL	21,0 a	39,9 a	7,8 a	7,1 a	75,8
GESSO	21,7 a	37,2 a	8,2 a	6,6 a	73,7
S (kg ha ⁻¹)					
CONTROLE	11,6 a	2,4 a	0,6 a	2,1 a	16,7
DOL	15,0 a	2,6 a	0,8 a	2,6 a	21,0
CAL	14,5 a	2,4 a	0,7 a	1,7 a	19,3
GESSO	14,4 a	2,4 a	0,9 a	1,4 a	19,1

Aos 30 meses foram observados valores similares nos tratamentos em relação ao estoque na biomassa florestal. Os valores observados para cálcio, magnésio e enxofre correspondentes ao estoque na parte aérea são aproximadamente a metade com relação aos encontrados para o final de uma rotação. O DOL apresentou a maior quantidade de cálcio, magnésio e enxofre absorvida na parte aérea e radicular (Tabelas 8, 9 e 10). No CAL se apresentou lixiviação de cálcio e magnésio. O tratamento mais eficiente na assimilação de cálcio e magnésio foi o CONTROLE, seguido do GESSO.

Tabela 8. Balanço nutricional de cálcio nos tratamentos fontes de cálcio na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.

Tratamento	Quantidade de cálcio						
	Original	Aplicada	Atmosférico ⁽¹⁾	Absorvida ⁽²⁾	Trocável no solo	Lixiviada	Assimilado
				Kg ha ⁻¹			
CONTROLE	28	0	24	271	33	0	521
DOL	28	443	24	307	188	0	62
CAL	28	443	24	273	44	178	55
GESSO	28	214	24	297	58	0	111

⁽¹⁾ Para estimativa da deposição atmosférica foram utilizados os dados de Laclau et al. (2010). ⁽²⁾ Para estimativa da quantidade de cálcio absorvida na parte radicular foram tomados os dados de Mello (2004).

Tabela 9. Balanço nutricional de magnésio nos tratamentos fontes de cálcio na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.

Tratamento	Quantidade de magnésio						
	Original	Aplicada	Atmosférico ⁽¹⁾	Absorvida ⁽²⁾	Trocável no solo	Lixiviada	Assimilado
				Kg ha ⁻¹			
CONTROLE	12	0	10	64	12	0	290
DOL	12	104	10	81	71	0	64
CAL	12	86	10	76	21	11	70
GESSO	12	0	10	74	5	0	336

⁽¹⁾ Para estimativa da deposição atmosférica foram utilizados os dados de Laclau et al. (2010). ⁽²⁾ Para estimativa da quantidade de cálcio absorvida na parte radicular foram tomados os dados de Mello (2004).

Foi encontrado uma baixa quantidade de enxofre na parte aérea em comparação à fornecida em todos os tratamentos, especialmente no GESSO, onde foram fornecidos 237 Kg ha⁻¹ de S. Os tratamentos apresentaram baixos teores de assimilação de enxofre, especialmente o GESSO (Tabela 10).

Tabela 10. Balanço nutricional de enxofre nos tratamentos fontes de cálcio na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.

Tratamento	Quantidade de enxofre						
	Original	Aplicada	Atmosférico	Absorvida	Trocável no solo	Lixiviada	Assimilado
				Kg ha ⁻¹			
DOL	173	72	10	21	181	53	8
CAL	173	72	10	19	77	159	7
GESSO	173	237	10	19	225	176	5

Os teores foliares de Ca, Mg, K e S encontraram-se na faixa adequada nas três datas de amostragem (Tabela 11). Os tratamentos CAL e DOL não apresentaram diferenças em relação ao CONTROLE nestas épocas de coleta. Contrário ao Ca, houve diminuição nos teores de Mg²⁺ entre 6 e 18 meses pós-plantio, voltando a aumentar aos 30 meses. Aos 6 meses, o CAL apresentou teor foliar 25% superior ao CONTROLE e, o DOL, 18%.

No GESSO, houve aumento do teor de foliar de Ca de 9% aos 6 meses, e, 18%, aos 18 meses. O teor de Mg²⁺ diminuiu em 12% em relação ao CONTROLE aos 18 meses. O teor de S aos 6 meses, apresentou teor 36% superior. Após a aplicação de gesso, ocorreu tendência de

aumento dos teores de Ca e de S e diminuição dos teores foliares de Mg, especialmente aos 6 e 18 meses pós-plantio, como também observado por RODRIGUES (2013) em plantação de eucalipto, e CAIRES et al. (2003), SORATTO E CRUSCIOL (2008), em culturas agrícolas.

O teor foliar de K^+ em todos os tratamentos, aos 6 meses pós-plantio, foi alto (Tabela 11). Aos 6 meses, não houve diferenças entre os tratamentos e, aos 18 meses, o GESSO apresentou teor foliar 16% superior, seguido do CAL (8%) comparado com o CONTROLE. RODRIGUEZ (2013), estudando o efeito da calagem e gessagem em plantação de eucalipto com 18 meses de idade, encontrou menores teores foliares de Ca, Mg e S em amostras coletadas no terço superior da copa. Este autor encontrou grande diferença no teor destes nutrientes, especialmente do Ca, dependendo da posição de amostragem (copa inteira, terço médio e terço superior).

Tabela 11. Análise foliar de *Eucalyptus urophylla* aos 6, 18 e 30 meses pós-plantio nos tratamentos

Tratamentos	Ca			Mg			K			S		
	6	18	30 m	6	18	30 m	6	18	30m	6	18	30m
	g kg ⁻¹											
CONTROLE	4,1b	4,4b	4,5a	2,7b	1,8 a	2,9a	10,5a	6,1a	5,0b	1,1 b	0,9a	0,9 a
DOL	4,2 a	4,8a	4,5a	3,2a	1,9 a	3,1a	11,0a	5,9a	5,4a	1,6 a	0,9a	0,9a
CAL	4,0 b	4,4b	4,6a	3,4 a	1,9 a	2,9a	9,6a	6,6ab	5,2b	1,4 ab	0,9a	0,7b
GESSO	4,5 a	5,0 a	4,3a	2,9 bc	1,6 b	2,8 b	11,1 a	7,1 a	6,1 a	1,5 a	0,9 a	0,6 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)

3.1.3. Distribuição de raiz fina no perfil de solo e umidade do solo

Em todos os tratamentos, na camada de 0 - 20 cm se concentraram entre 67 e 75% do total das raízes finas. Na camada de 0 - 10 cm, houve menor densidade de raiz fina (DRF) nos tratamentos DOL, CAL e GESSO, em todas as datas de amostragem (Figura 10 a e b). Na primeira amostragem, os tratamentos não apresentaram diferenças significativas entre si, entre 10 e 40 cm de profundidade. O CAL apresentou menor média de densidade de raiz fina ao longo do perfil, comparativamente aos demais tratamentos. Na camada 40 – 60 cm, houve maior DRF no GESSO comparativamente ao DOL e CAL. A umidade no solo nos tratamentos foi considerada baixa, variando entre 2 e 13%. Aos 6 meses, foi similar em todas as profundidades (Figura 11a).

Aos 18 meses, a DRF do DOL foi maior que no CONTROLE ao longo do perfil do solo, exceto entre 20 e 60 cm de profundidade. Esse tratamento apresentou os menores valores de DRF e de quantidade de raiz fina acumulada. Os tratamentos CAL e GESSO apresentaram comportamento similar ao longo do perfil de solo (Figura 10b). O DOL apresentou a menor umidade ao longo do perfil do solo, aos 18 meses. Os tratamentos GESSO e CAL apresentaram comportamento similar em relação ao CONTROLE (Figura 11b).

A maior quantidade de raízes finas no CONTROLE na camada de 0 - 10 cm aos 10 e 18 meses e, os menores valores no CAL na camada 40 – 60 cm aos 6 meses e, no DOL, na camada 0 – 10 cm aos 18 meses, mostraram que a configuração radicular do eucalipto é fortemente influenciada pelas características químicas do solo (GONÇALVES E MELLO, 2004; GREEN et al., 2005). GOMES (2001) encontrou para *E. urophylla* em casa de vegetação maior densidade de raiz fina nos tratamentos com menores teores de bases trocáveis e maiores teores de Al^{3+} trocável no solo.

Essa alta capacidade de interação com o solo indica que, quando em menores disponibilidades de nutrientes e água, a densidade de raiz é ampliada, permitindo que maior volume de solo seja explorado, aumentando a capacidade de absorção de água e nutrientes pelas árvores (GONÇALVES E MELLO 2004). Esses resultados estão de acordo com a teoria fonte – dreno, segundo a qual as árvores alocam maior energia para o crescimento de raízes em solos com algum tipo de deficiência hídrica e de fertilidade, procurando aumentar a aquisição de água e nutrientes (BLOOM et al., 1985).

Figura 10. Densidade de raiz fina no perfil de solo aos 6 (a), 18 (b) e 33 (c) meses e quantidade acumulada de raiz fina em área total aos 6 (d), 18 (e) e 33 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico, nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$).

Cabe salientar que as épocas das coletas referentes a 10 e 18 meses pós-plantio corresponderam a julho de 2014 e abril de 2015. Durante este período, na região onde foi instalado o experimento houve diminuição de 25% da precipitação pluvial esperada (MARENGO; ALVES, 2016). Para esse ambiente, a falta de chuva mostrou que em idades jovens não há diferenciação das raízes finas superficialmente. Isso sugere que em períodos como este, a fertilização com gessagem e calagem não impactou o desenvolvimento de raízes, sendo a água, e não a disponibilidade de nutrientes, o principal controlador do desenvolvimento radicular.

BOUILLET *et al.* (2002) encontraram um rápido desenvolvimento radicular além dos 3 m de em plantações clonais de eucalipto no Congo, sob solos arenosos de baixa fertilidade e distribuição irregular de chuva. RODRIGUEZ (2013), na camada 0 – 60 cm de profundidade, em povoamento de *Eucalyptus grandis* com 18 meses de idade, plantado em um Latossolo de textura média na região do cerrado de Minas Gerais, encontrou valores de DRF similares ao deste estudo com a aplicação de calcário dolomítico.

Aos 33 meses pós-plantio, na camada de 0 - 40 cm, o CONTROLE apresentou aumento expressivo na DRF, comparado com a primeira (39%) e a segunda coleta (54%). O mesmo ocorreu com a quantidade acumulada de raízes finas. Na camada de 0 – 10 cm, o CONTROLE apresentou diferenças significativas em relação aos outros tratamentos. Na camada 10 – 40 cm, os tratamentos DOL e GESSO apresentaram distribuição similar de raízes finas na superfície. No CAL, foram encontrados menores valores da DRF. Na camada de 40 – 100 cm, o CAL apresentou menores valores de DRF em relação ao GESSO e DOL. Na camada de 100 – 160, não houve diferenças entre os tratamentos. (Figura 10c).

Aos 33 meses pós-plantio, na camada de 0 – 60 cm, em todos os tratamentos houve aumento na umidade relativamente aos valores encontrados aos 18 meses, devido ao maior crescimento das árvores (LACLAU *et al.*, 2013; CHRISTINA *et al.*, 2011), o que indica aumento da capacidade de absorção de água e nutrientes. Os tratamentos não apresentam diferenças em relação ao CONTROLE, na camada de 100 – 160 cm (Figura 11c).

Figura 11. Teor de água no solo aos 6 (a), 18 (b) e 33 (c) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico, nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$).

3.1.4. Crescimento das árvores

Os tratamentos influenciaram o crescimento em altura ($p < 0,05$), exceto para a avaliação 20 meses pós-plantio (Figura 12). O CONTROLE apresentou os menores valores de altura e DAP desde os 7 meses de idade. O DOL apresentou alturas superiores aos 7 (10%), 11 (5%), 30 (4%) e 38 meses pós-plantio (7%) em relação ao CONTROLE. O DAP foi diferente entre os tratamentos ($p < 0,15$), exceto aos 11 meses pós-plantio. O CONTROLE apresentou os menores valores em todas as idades. No DOL, o DAP foi 4% superior ao CONTROLE, aos 30 e 38 meses.

O volume do tronco apresentou diferenças significativas entre os tratamentos aos 38 meses pós-plantio. O DOL apresentou maior volume nesta idade (10%), seguido do CAL (6%) e do GESSO (4%) (Tabela 12).

Figura 12. Altura (a) e diâmetro à altura do peito (DAP) (b) ao longo do tempo, nos tratamentos CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; CAL – 1200 kg ha⁻¹ de Calcário calcinado; e GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso agrícola. As barras verticais indicam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$).

Tabela 12. Volume do tronco com casca aos 30 e 38 meses dos povoamentos clonais de *E. urophylla* em função da aplicação dos tratamentos.

Tratamento	Volume	
	30º mês	38º mês
	m ³ ha ⁻¹	
CONTROLE	116 a	143 c
DOL	125 a	157 a
CAL	119 a	152 ab
GESSO	118 a	148 bc

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)

Os tratamentos diferiram na produção de biomassa aérea total (Tabela 14). O CONTROLE apresentou os menores valores. No DOL houve aumento de 28% e, no CAL e no GESSO de 22% em relação ao CONTROLE. Para o lenho, o aumento no DOL foi 29% e, no CAL e no GESSO, 25%. A biomassa de folha, nos diferentes tratamentos foi 50% superior ao CONTROLE. A densidade do tronco no CONTROLE apresentou 16% de redução com relação aos tratamentos DOL e CAL 17% com relação ao GESSO. A densidade básica influencia no manejo das florestas de eucalipto. Esta característica é de importância na definição da idade de corte devido ao seu incremento observado ao longo dos anos.

Tabela 13. Biomassa aérea e densidade do tronco de *E. urophylla* aos 30 meses nos diferentes tratamentos.

Tratamento	Lenho	Casca	Ganho	Folha	Total	Densidade do tronco
	Mg ha ⁻¹					g cm ⁻³
CONTROLE	65 b	14 a	3 a	2 b	84 b	0,68 b
DOL	84 a	15 a	6 a	3 a	108 a	0,79 a
CAL	81 a	14 a	5 a	3 a	103 a	0,79 a
GESSO	81 a	14 a	5 a	3 a	103 a	0,80 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)

O *Eucalyptus*, considerado um gênero com espécies tolerantes à toxidez de Al e acidez de solo (BARROS; NOVAIS, 1990), em casos especiais, apresenta resposta à aplicação de Ca. Geralmente, é mais provável ocorrer resposta em solos de textura arenosa, na região do cerrado, onde há déficit hídrico (GONÇALVES et al., 2013). RODRIGUES et al. (2016) encontraram um ganho médio de 58% no volume de fuste com aplicação de 3 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, comparado à aplicação de calcário em LVA de textura média. Provavelmente, a quantidade de CaO fornecida pelo gesso em comparação aos calcários (300 vs 620 kg ha⁻¹) teve efeito no volume do tronco apresentado neste estudo. Encontrou-se aumento na produção de biomassa nos tratamentos com aplicação de calcário, especialmente no compartimento lenho.

Aos 30 meses pós-plantio, o índice PV50 para o tratamento CONTROLE foi 46,6%, o DOL e o CAL com 46,8% e o GESSO 46,9%. Segundo HAKAMADA (2012), valores de PV 50 superiores a 34% representam florestas de boa homogeneidade em plantações clonais de eucalipto. Entre os 24 e 36 meses de idade, muda-se o fator limitante às plantações e a disponibilidade de água e luz passam a reagir o crescimento da floresta e as diferenças à fertilização diminuem (LACLAU et al., 2010). No entanto, nos tratamentos fontes de cálcio se começam a observar diferenças no volume entre 30 e 38 meses pós-plantio. Provavelmente para o final do ciclo estas diferenças dos tratamentos com cálcio comparadas com o CONTROLE serão mais evidentes.

3.2. Experimento 2 - Respostas à localização e incorporação do calcário dolomítico

3.2.1. Fertilidade do solo

O teor de Ca^{2+} trocável aumentou até os 30 cm de profundidade com a aplicação de calcário dolomítico em faixa. No DOL, aos 6 meses, na camada de 0 – 30 cm, os teores de Ca^{2+} foram considerados médios ($5,8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$). No DOL INC, os teores de Ca^{2+} trocável foram maiores nas camadas 20 – 40 cm que no CONTROLE. No DOL AT, os valores nesta camada são similares ao CONTROLE (Figura 13a). Aos 18 meses, no DOL AT, o teor de Ca^{2+} diminuiu abaixo da camada dos 10 cm. O DOL INC apresentou valores similares ao CONTROLE (Figura 13b). Aos 36 meses pós-plantio, o efeito foi mais pronunciado. O DOL, na camada 0 – 10 cm, apresentou teor de Ca^{2+} trocável de $14,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, no DOL AT, de $13,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e no DOL INC de $3,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. No DOL AT, o teor de Ca^{2+} diminuiu abaixo da profundidade de 10 cm. No DOL, o teor de Ca^{2+} também diminuiu gradualmente (Figura 13c). A quantidade acumulada de Ca^{2+} foi maior no DOL, seguido de DOL AT (Figura 13 d, e, f). O maior teor de Ca^{2+} no DOL se deve a um efeito de concentração da aplicação de calcário dolomítico na faixa, pois nestes dois tratamentos, a quantidade de calcário aplicada (443 kg ha^{-1} de cálcio) foi igual. A faixa corresponde a 33% da área total, portanto a concentração do calcário na faixa foi três vezes maior que na aplicação em área total. RODRIGUES (2013) encontrou em plantio de eucalipto cultivado em Latossolo Vermelho Amarelo, na camada 0 – 40 cm, menores teores de Ca^{2+} com aplicação de calcário dolomítico em área total comparados com a aplicação em faixa.

O teor de Mg^{2+} trocável aumentou ao longo do perfil de solo no DOL aos 6 meses pós-plantio. No DOL AT os teores foram similares ou menores que o CONTROLE (Figura 14a) e, a quantidade de Mg^{2+} acumulada, menor (Figura 14d). O DOL INC apresentou maiores teores de Mg^{2+} na camada de 20 – 40 cm. Dezoito meses depois, o DOL proporcionou aumento do teor de Mg^{2+} aproximadamente duas vezes maior que o CONTROLE. Abaixo dos 30 cm, o teor de Mg^{2+} decresceu gradualmente. (Figura 14b). Aos 36 meses, o DOL apresentou dois picos, o primeiro na camada 0 - 20 cm com teor médio de $8,8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e, o segundo, na camada 60 – 100 cm, com teor médio de $7,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Aos 18 e aos 36 meses o DOL AT e o DOL INC apresentaram teores similares que o CONTROLE ao longo do perfil de solo (Figura 14 b,c). Aos 18 e 36 meses pós-plantio, a quantidade de Mg^{2+} acumulada é maior no DOL, seguida de DOL AT e de DOL INC (Figura 14 e, f).

Figura 13. Teores de cálcio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de cálcio trocável acumulada na faixa de aplicação para DOL e DOL INC aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL AT - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em área total; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa; DOL INC - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa incorporado a 20 cm com enxada. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

Figura 14. Teor de magnésio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de magnésio trocável acumulada na faixa de aplicação para DOL e DOL INC aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL AT - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em área total; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa; DOL INC - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa incorporado a 20 cm com enxada. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

No DOL, a lixiviação de Ca^{2+} foi maior devido à grande formação de pares iônicos na forma de CaCO_3^0 , em pH maior do que 5,0 (CaCl_2 0,01 mol L^{-1}) (CAIRES et al., 2000, SOUSA et al., 2007). A movimentação descendente de Ca^{2+} e Mg^{2+} no perfil de solo é lenta e pode estar influenciada por fatores biológicos. Com a manutenção de resíduos há liberação contínua de substâncias orgânicas hidrossolúveis que, ao se deslocarem, ao longo do perfil podem agir como carregadores de Ca^{2+} e Mg^{2+} atuando como pares iônicos (RHEINHEIMER et al., 2000). RODRIGUES (2013) encontrou resultados opostos com aumentos de Ca^{2+} em 25% e Mg^{2+} em 21% na camada de 0 – 60 cm, em decorrência da incorporação de calcário dolomítico em plantio de eucalipto em Latossolo Vermelho. AULER et al. (2017) observaram em Cambissolo no Paraná redução no teor de macronutrientes com a incorporação de calcário dolomítico, provavelmente atribuído à dispersão de argila em água.

Aos 6 meses pós-plantio, o pH do DOL foi maior no perfil de solo que no CONTROLE, diminuindo com o aumento de profundidade. No DOL AT, houve aumentos nas camadas 20 – 30 cm e 30 – 40 cm (Figura 15a). Dezoito meses depois no DOL, houve aumento em comparação ao DOL AT até 60 cm de profundidade (Figura 15b). Abaixo desta profundidade, o pH do DOL apresentou tendência a se estabilizar com valores entre 4,4 e 4,6. Os valores para o DOL AT nesta camada foram entre 4,3 e 4,5. Aos 36 meses, na camada de 0 – 10, o DOL AT apresentou valor de 5. Com o aumento de profundidade, o pH diminuiu no perfil de solo. O DOL, na camada 0 – 10, apresentou valor de 4,7. Entre 10 – 60 cm de profundidade diminui o valor de pH (Figura 15 c). Em todas as épocas de amostragem, no DOL INC, os valores de pH foram menores ao longo do perfil de solo com relação ao CONTROLE.

Aos 6 meses pós-aplicação dos tratamentos o DOL AT apresentou maior valor de Al^{3+} na camada 0 - 10 cm. Abaixo desta camada os valores foram menores ou similares que o CONTROLE (Figura 15d). Aos 18 meses pós-plantio, o DOL AT apresentou maiores valores em relação ao CONTROLE no perfil de solo, exceto na camada 20 – 30 cm e na camada 140 – 160 cm (Figura 15e). Aos 36 meses pós-aplicação dos tratamentos, no DOL AT, houve a tendência de apresentar menores valores que o CONTROLE abaixo dos 40 cm de profundidade (Figura 15f). No DOL INC, o teor de Al^{3+} trocável ao longo do perfil foi maior que no DOL, em todas as épocas de amostragem.

Figura 15. pH em CaCl₂ e acidez trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de alumínio trocável aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL AT - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em área total; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa; DOL INC - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa incorporado a 20 cm com enxada. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

A aplicação de calcário dolomítico em faixa aumentou os valores de pH mais do que a aplicação em área total. AULER et al. (2017) encontraram aumentos nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocável, no pH e reduções nos teores de Al^{3+} trocável com aplicação de 15 t ha^{-1} de calcário dolomítico em área total comparado com a ausência de aplicação em Inceptisol cultivado com culturas agrícolas no Paraná. O DOL INC promoveu redução do pH e aumentos nos teores de Al^{3+} trocável ao longo do perfil nas diferentes épocas de amostragem. Provavelmente, a incorporação do calcário dolomítico aumentou a taxa de decomposição da matéria orgânica, aumentando a solubilização de fontes complexadas de Al^{3+} , devido à redução do pH do solo (BRADY; WEIL 2013, ROCHA et al., 2016). As altas correlações entre pH e Al^{3+} explicam o efeito do pH sobre a quantidade de Al^{3+} nos complexos de troca (MOTA; MELO, 2009). CIOTTA et al. (2004) observaram aumentos no teor de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocável e no pH na camada 0 – 4 cm, com a incorporação de calcário dolomítico. Abaixo desta camada até 40 cm de profundidade, a incorporação ou não do calcário dolomítico teve a mesma eficiência na elevação do pH e dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis, promovendo menor saturação por Al^{3+} trocável. A não incorporação do calcário diminui a superfície de contato entre as partículas de solo e as do corretivo, retardando os efeitos da calagem e restringindo as reações aos centímetros superficiais do solo (CASSOL, 1995).

Aos 6 meses, no DOL houve aumento nos teores de SO_4^{2-} na camada 10 – 40 cm. Abaixo desta camada o teor de S- SO_4^{2-} diminuiu. O DOL INC apresentou menores valores ao longo do perfil de solo (Figura 16a). O DOL AT apresentou menores valores ao longo do perfil de solo, exceto na camada 20 – 30 cm (Figura 16a). Dezoito meses depois, o DOL, até 60 cm de profundidade, apresentou aumentos em relação ao CONTROLE. Abaixo desta profundidade, os aumentos foram expressivos. O DOL AT apresentou menores valores no perfil de solo que o CONTROLE (Figura 16b). No DOL, houve maior quantidade de SO_4^{2-} acumulada, seguido do CONTROLE, DOL INC e DOL AT (Figura 16e). Aos 36 meses, os tratamentos DOL e DOL AT apresentaram menores quantidades acumuladas de S- SO_4^{2-} que aos 18 meses. O DOL AT apresentou teores menores que o CONTROLE até a profundidade de 80 cm. Abaixo desta camada, até 140 cm de profundidade, o teor de S- SO_4^{2-} aumentou levemente em relação ao CONTROLE (Figura 16c). As quantidades acumuladas nos tratamentos DOL INC, DOL e DOL AT foram maiores que o CONTROLE (Figura 16f).

Figura 16. Teor de enxofre aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de enxofre acumulada na faixa de aplicação para DOL e DOL INC aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; DOL AT - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em área total; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa; DOL INC - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa incorporado a 20 cm com enxada. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

Aos 6 e 18 meses pós-plantio, os teores de SO_4^{2-} no DOL foram maiores que no DOL INC, ao longo do perfil de solo (Figura 22a,b). Se observa uma alta migração de S-SO_4^{2-} , nos tratamentos, especialmente aos 18 meses (Figura 16b). Aos 36 meses pós-plantio, houve diminuição dos teores de S-SO_4^{2-} , provavelmente, devido à lixiviação profunda pela textura do solo. Os aumentos do teor de S-SO_4^{2-} no DOL em comparação ao DOL AT, na camada superficial, devem ter sido influenciados pelo pH. Houve alta correlação entre estas duas variáveis ($r = 0.70$; $p = 0,002$). O pH é um dos principais fatores que controlam a disponibilidade e movimentação do SO_4^{2-} no solo (ALVAREZ et al., 2007). Provavelmente, no DOL, apesar de não ter havido revolvimento do solo, o aumento do pH neste tratamento, deve ter induzido a maior mineralização de S (SILVA; MENDOÇA, 2007). SILVA et al. (1999), avaliando a influência da calagem sobre a mineralização de compostos orgânicos com S em diferentes solos, observaram maiores teores de SO_4^{2-} após a calagem em Latossolo Vermelho Amarelo na camada 0 – 20 cm.

Os valores apresentados aos 6 meses pós-plantio de K^+ trocável no CONTROLE, DOL, DOL AT e DOL INC (Figura 17a) foram pela quantidade aplicada de K_2O na primeira fertilização de cobertura. Aos 18 meses, até a profundidade de 100 cm, o teor de K^+ foi menor no DOL e no DOL INC que no CONTROLE. No DOL AT, até a profundidade de 60 cm, os valores de K^+ trocável foram menores que o CONTROLE. Abaixo desta camada, os valores foram menores (Figura 17b). A quantidade acumulada de K^+ no DOL e DOL AT foi menor em relação ao CONTROLE (Figura 17f). Aos 36 meses, no tratamento DOL, os valores de K^+ foram menores, exceto na camada 0 – 10 e abaixo dos 100 cm. No DOL AT, o teor de K^+ foi menor que o CONTROLE, exceto na camada 100 – 160 cm (Figura 17c). No DOL INC, os valores de K^+ foram maiores ao longo do perfil de solo que no CONTROLE, exceto na camada 0 – 10 cm (Figura 17c). A quantidade acumulada foi maior nos tratamentos DOL, DOL AT e DOL INC em relação ao CONTROLE (Figura 17e). Houve maior percolação acumulada de K^+ no CONTROLE em todas as datas amostradas, em comparação com o DOL, DOL AT e DOL INC (Figura 17). FLORA (2006) observou este comportamento em condições de laboratório em Cambissolo húmico. Devido à formação do par iônico $\text{Ca}(\text{Cl})_2$. A lixiviação é um fenômeno mais intenso em solo arenoso e com baixa CTC.

Figura 17. Teor de potássio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de potássio trocável acumulada na faixa de aplicação para DOL e DOL INC aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL AT - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em área total; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa; DOL INC - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa incorporado a 20 cm com enxada. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

3.2.2. Balanço nutricional e absorção de nutrientes

O DOL INC apresentou menor acúmulo de Ca na casca. Nos outros compartimentos os valores foram similares (Tabela 14). A casca do eucalipto é importante no ciclo biogeoquímico, por ser dreno de nutrientes e por ser normalmente retirada do sítio pela colheita florestal (SANTANA et al., 2008). O *E. grandis* pode acumular na casca 39 a 48% do Ca existente na copa. Alguns trabalhos demonstram elevado acúmulo de Ca na casca de eucalipto (PEREIRA et al., 1984; NEVES, 2000). Os teores inferiores de Ca na casca provavelmente se devem à redução na disponibilidade de Ca^{2+} no solo. O acúmulo de Mg e S foi similar nos tratamentos em cada um dos compartimentos estudados. Para os tratamentos o acúmulo de Ca e Mg foi maior na casca, seguida do lenho. Para o S o maior acúmulo foi encontrado no lenho (Tabela 16).

Tabela 14. Acúmulo de Ca, Mg e S nos compartimentos aéreos das árvores de eucalipto nos tratamentos localização e incorporação de calcário dolomítico.

Tratamento	Tronco		Copa		Total
	Lenho	Casca	Galho	Folha	
	Ca (kg ha ⁻¹)				
CONTROLE	46,4 a	204,0 a	9,5 b	9,7 a	269,6
DOL AT	52,6 a	199,2 a	15,4 a	17,8 a	285,0
DOL	52,7 a	224,5 a	15,7 a	13,3 a	306,2
DOL INC	51,1 a	173,4 b	18,5 a	15,7 a	258,7
	Mg (kg ha ⁻¹)				
CONTROLE	17,4 a	36,0 a	4,6 a	6,3 a	64,3
DOL AT	19,5 a	39,6 a	5,8 a	10,0 a	74,9
DOL	22,5 a	42,9 a	6,4 a	9,1 a	80,9
DOL INC	21,9 a	36,5 a	7,0 a	7,9 a	73,3
	S (kg ha ⁻¹)				
CONTROLE	11,6 a	2,4 a	0,6 a	2,1 a	16,7
DOL AT	12,0 a	2,5 a	0,8 a	2,5 a	17,8
DOL	15,0 a	2,6 a	0,8 a	2,6 a	21,0
DOL INC	7,3 b	2,3 a	0,9 a	2,6 a	13,1

Foram aplicados aos tratamentos com localização e incorporação de cálcio a mesma quantidade de cálcio e magnésio. O tratamento mais eficiente na assimilação de cálcio e magnésio foi o DOL, seguido do DOL AT e DOL INC (Tabela 15, 16).

Tabela 15. Balanço nutricional de cálcio nos tratamentos localização e incorporação de cálcio na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.

Tratamento	Quantidade de cálcio						
	Original	Aplicada	Atmosférico ⁽¹⁾	Absorvida ⁽²⁾	Trocável no solo	Lixiviada	Assimilado
	Kg ha ⁻¹						%
CONTROLE	28	0	24	271	33	0	521
DOL AT	28	443	24	285	146	64	57
DOL	28	443	24	307	188	0	62
DOL INC	28	443	24	259	214	22	52

⁽¹⁾ Para estimativa da deposição atmosférica foram utilizados os dados de Laclau et al. (2010). ⁽²⁾ Para estimativa da quantidade de cálcio absorvida na parte radicular foram tomados os dados de Mello (2004).

Tabela 16. Balanço nutricional de magnésio nos tratamentos localização e incorporação de cálcio na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.

Tratamento	Quantidade de magnésio						
	Original	Aplicada	Atmosférico ⁽¹⁾	Absorvida ⁽²⁾	Trocável no solo	Lixiviada	Assimilado
	Kg ha ⁻¹						%
CONTROLE	12	0	10	64	12	0	290
DOL AT	12	86	10	75	16	17	69
DOL	12	86	10	76	21	11	70
DOL INC	12	86	10	73	8	27	67

⁽¹⁾ Para estimativa da deposição atmosférica foram utilizados os dados de Laclau et al. (2010). ⁽²⁾ Para estimativa da quantidade de cálcio absorvida na parte radicular foram tomados os dados de Mello (2004).

Os teores foliares de Ca⁺ e Mg⁺ nos tratamentos DOL, DOL AT e DOL INC ficaram dentro na faixa adequada nas três datas de amostragem, exceto para o teor foliar de Mg aos 18 meses pós-plantio, que foi levemente abaixo (Tabela 17). Aos 30 meses, os teores foliares de Mg aumentaram. As análises foliares realizadas após a fase de fechamento das copas, tende a diminuir a demanda por nutrientes do solo em virtude da otimização do ciclo bioquímico, sendo cada vez menor a resposta das árvores à fertilização mineral após o fechamento das copas (GONÇALVES *et al.*, 2000). RODRIGUES (2013) não encontrou diferenças nos teores foliares de Ca⁺ e Mg⁺ no terço superior da copa, aos 18 meses pós-plantio, comparando os efeitos da localização da aplicação do calcário dolomítico.

Os teores foliares de K⁺ diminuíram expressivamente entre 6 e 18 meses pós-plantio. Aos 30 meses, o DOL INC aumentou 12% em relação ao CONTROLE. Respostas à fertilização antes do fechamento de copas são comuns. Nas situações em que há resposta a fertilização, as taxas de absorção de nutrientes e a atividade metabólica são elevadas (GONÇALVES *et al.*, 2000). Para o S, houve diminuição dos teores foliares entre 6 e 18 meses. Aos 6 meses, no

DOL AT E no DOL INC, houve aumento de 36% e, no DOL, de 45%. Aos 18 e 30 meses, não foram encontradas diferenças entre os tratamentos. O S encontrou-se na faixa considerada adequada nas três amostragens (GONÇALVES, 2010).

Tabela 17. Análise foliar de *Eucalyptus urophylla* aos 6, 18 e 30 meses pós-plantio nos tratamentos localização e incorporação de calcário dolomítico.

Tratamento	Ca			Mg			K			S		
	6	18	30 m	6	18	30 m	6	18	30m	6	18	30m
	g kg ⁻¹											
CONTROLE	4,1b	4,4b	4,5a	2,7b	1,8 a	2,9a	10,5a	6,1a	5,0b	1,1 b	0,9a	0,9 a
DOL	4,2 a	4,8a	4,5a	3,2a	1,9 a	3,1a	11,0a	5,9a	5,4a	1,6 a	0,9a	0,9a
DOL AT	4,0 a	4,2b	4,2a	3,3 a	2,0 a	2,9a	11,1a	6,3a	5,3a	1,5 a	1,0a	0,7a
DOL INC	4,9 a	4,6a	4,8a	3,2 a	1,9 a	3,2a	13,1a	6,2a	6,0a	1,5 a	1,0a	0,8a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)

3.2.3. Distribuição de raiz fina no perfil de solo e umidade do solo

Na primeira data de amostragem, na camada de 0 – 20, se concentraram 75% do total das raízes finas. Na camada 0 – 10 cm, houve menores valores nos tratamentos DOL e DOL INC que no CONTROLE. Não houve diferenças entre os tratamentos na camada 10 – 40 cm. Na camada 40 – 60 cm, o menor valor observado ocorreu no tratamento DOL INC (Figura 18a). A quantidade acumulada de raiz fina foi menor no DOL INC (Figura 18b). A umidade no solo nos tratamentos DOL e DOL INC foi considerada baixa, variando entre 2 e 11%. Aos 6 meses, foi similar em todas as profundidades (Figura 19a)

Aos 18 meses, no DOL houve a menor quantidade de DRF nas camadas 0 – 40 cm de profundidade. No DOL INC, não houve diferenças significativas relativamente ao CONTROLE. Na camada 40 – 160 cm, o DOL INC apresentou maiores valores que no CONTROLE (Figura 18b). A quantidade acumulada de raízes finas foi menor no DOL (Figura 18e). O tratamento DOL apresentou a menor umidade no perfil de solo, exceto na camada 0 – 10 cm. Nesta camada, no DOL INC, houve maior conteúdo de água no solo. Abaixo desta camada, os valores foram similares ao CONTROLE (Figura 18b).

Aos 33 meses, o CONTROLE proporcionou aumento na DRF de duas vezes na camada 0 – 10 cm em relação aos tratamentos DOL e DOL INC. Na camada 0 – 40 cm, houve diferenças entre o CONTROLE e os demais tratamentos. Na camada 60 – 160 cm, o DOL INC apresentou diferenças em relação ao CONTROLE (Figura 18c). Não ocorreram diferenças na DRF acumulada nos tratamentos DOL e DOL INC (Figura 18f). Na camada 0 – 10 cm, o DOL apresentou a maior umidade (11%). Abaixo desta camada, a umidade diminuiu gradualmente.

Observou-se diferenças significativas nas camadas 20 – 40 cm e 60 – 160 cm. O DOL INC apresentou valores similares ao CONTROLE (Figura 19c).

Figura 18. Densidade de raiz fina no perfil de solo aos 6 (a), 18 (b) e 33 (c) meses e quantidade acumulada de raiz fina em área total aos 6 (d), 18 (e) e 30 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; DOL INC – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico incorporado. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$).

Figura 19. Teor de água no solo aos 6 (a), 18 (b) e 33 (c) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico; DOL INC – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico incorporado. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$).

Houve efeitos positivos na incorporação do calcário dolomítico sobre a DRF ao longo do perfil aos 18 meses (Figura 18b). A maior quantidade de raízes finas acumuladas aos 6 meses foi no CONTROLE (Figura 18d). Em menores disponibilidades de nutrientes, a densidade de raiz é ampliada, permitindo que maior volume de solo seja explorado, aumentando a capacidade

de absorção de água e nutrientes pelas árvores (GONÇALVES E MELLO 2004). Aos 36 meses pós-plantio, no CONTROLE, o comportamento foi melhor expressado. RODRIGUES (2013) encontrou efeitos positivos na DRF de eucalipto com a incorporação de calcário dolomítico somente na camada 10 – 20 cm. Aos 30 meses, o CONTROLE apresentou aumentos expressivos na DRF, na camada superficial.

Esperava-se que com o aumento de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocável e a redução de acidez, promovido pelo DOL, teria havido aumento da DRF. No entanto, o efeito foi o contrário em relação ao CONTROLE. Neste tratamento, a baixa disponibilidade de Ca^{2+} e Mg^{2+} estimulou o crescimento radicular como uma forma da árvore conseguir aumentar sua aquisição de nutrientes (BLOOM et al., 1985).

3.2.4. Crescimento das árvores

Os tratamentos influenciaram o crescimento em altura ($p < 0,05$), aos 11 e aos 38 meses pós-plantio (Figura 20a). O CONTROLE apresentou os menores valores em todo o período amostral. O DOL AT e DOL INC não se diferenciou do CONTROLE, exceto, aos 38 meses, sendo 4% superior (Figura 20a). O crescimento em DAP apresentou diferenças significativas entre os tratamentos ($p < 0,05$), exceto aos 11 meses pós-plantio. O DOL AT não se diferenciou do CONTROLE, exceto aos 7 meses, sendo 17% superior. O DOL INC apresentou valores superiores ao CONTROLE, aos 7 (19%) e 20 meses (9%) pós-plantio (Figura 20b).

Figura 20. Altura (a) e diâmetro à altura do peito (DAP) (b) ao longo do tempo nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; DOL AT - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em área total; DOL – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico em faixa; DOL INC – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico incorporado. As barras verticais indicam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$).

Se apresentaram tendências similares entre os crescimentos em volume e os valores de PV50 entre os tratamentos. Aos 30 meses o PV50 para o CONTROLE foi 46,6%, para o DOL AT 46,1%, para o DOL 46,8% e para DOL INC 46,6%. Comparado com o estudo de MELO (2014), os valores encontrados neste estudo são maiores. Elevados valores de PV 50 refletem boas produtividades obtidas. Não foi observado que as árvores nos tratamentos aumentaram as diferenças de crescimento com maior velocidade, por tanto as árvores menores não cresceram a ritmos menores na idade avaliada. Como foi observado um alto índice PV50 nos tratamentos a representatividade percentual das 50% menores árvores não crescem menos e não se distanciam da metade superior da parcela.

Não se observaram diferenças significativas entre os tratamentos quanto ao volume de tronco, aos 30 meses de idade. Aos 38 meses o DOL foi 10% superior ao CONTROLE e o DOL AT e DOL INC, 6% (Tabela 18). Esta maior produtividade se deve, em grande parte, a maior aquisição de nutrientes do solo e/ou melhor eficiência de uso dos nutrientes (NEVES, 2000). A fertilização adequada com calagem é recomendada para obter maiores produtividades e evitar a exaustão do solo, principalmente o cálcio, nutriente bastante exportado na madeira por ocasião da colheita (ROCHA et al., 2008). RODRIGUES et al. (2016) não encontraram diferenças nos tratamentos que receberam a aplicação de calcário incorporado ou não incorporado. Este autor ressalta que este resultado aconteceu devido à boa disponibilidade de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocável no solo, em ambos os tratamentos.

Tabela 18. Volume do tronco com casca dos povoamentos clonais de *E. urophylla* em função da idade nos tratamentos localização e incorporação de calcário dolomítico.

Tratamento	Volume	
	30º mês	38º mês
	m ³ ha ⁻¹	
CONTROLE	116 a	143 c
DOL AT	120 a	152 b
DOL	125 a	157 a
DOL INC	117 a	151 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)

Aos 38 meses, O CONTROLE apresentou a menor biomassa aérea total, bem como de lenho, folha e biomassa aérea total. Nos tratamentos DOL e DOL AT houve aumento de 28% na biomassa total em relação ao CONTROLE. No DOL INC houve um aumento de 22%. As práticas silviculturais também podem proporcionar alterações na madeira a ponto de influenciar a qualidade do produto final (ZOBEL, 1992). A fertilização com cálcio, produz uma proporção elevada de densidade do tronco (Tabela 19). Segundo WILKINS E HORNE (1991) observaram influência em práticas de fertilização entre outras práticas silviculturais na densidade básica da

madeira de *E. grandis* com 4,5 anos de idade na Austrália, proporcionando maior crescimento das árvores.

Tabela 19. Biomassa aérea e densidade do tronco de *E. urophylla* aos 30 meses nos tratamentos localização e incorporação de calcário dolomítico.

Tratamento	Lenho	Casca	Galho	Folha	Total	Densidade do tronco
			Mg ha ⁻¹			g cm ⁻³
CONTROLE	65 b	14 b	3 a	2 b	84 b	0,68 b
DOL AT	84 a	15 a	6 a	3 a	108 a	0,82 a
DOL	84 a	15 a	6 a	3 a	108 a	0,79 a
DOL INC	81 a	13 a	6 a	3 a	103 a	0,80 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)

3.3. Experimento 3 - Resposta à gessagem

3.3.1. Fertilidade do solo

O teor de Ca^{2+} trocável aumentou ao longo do perfil de solo com a aplicação de apenas gesso ou da mistura calcário dolomítico + gesso. Aos 6 meses, na camada 0 – 30 cm, a aplicação de 214 Kg ha⁻¹ de Ca^{2+} fornecido no GESSO elevou o teor de Ca^{2+} no solo a 4,3 mmol_c dm⁻³. Os 645 Kg ha⁻¹ de Ca^{2+} fornecido no DOL+GESSO elevou o teor de Ca^{2+} a 5,4 mmol_c dm⁻³. E, os 832 Kg ha⁻¹ de Ca^{2+} fornecido no DOL+2GESSO elevou o teor de Ca^{2+} a 8,5 mmol_c dm⁻³. Os teores de Ca^{2+} foram considerados médios (5,4 e 4,3 mmol_c dm⁻³) para plantações de eucalipto (GONÇALVES, 2010). Na subsuperfície, o teor de Ca^{2+} trocável foi diminuindo a partir dos 40 cm de profundidade (Figura 21 a). O tratamento DOL+2GESSO apresentou a maior quantidade de Ca^{2+} acumulado ao longo do perfil (Figura 21 d). Dezoito meses depois, os tratamentos DOL+GESSO e DOL+2GESSO proporcionaram teores médios de Ca^{2+} igual a 7,1 e 10,7 mmol_c dm⁻³ na camada 0 – 30 cm, respectivamente (Figura 21 b). No GESSO, o teor de Ca^{2+} trocável foi similar ou menor no que o CONTROLE no perfil de solo. Aos 36 meses pós-plantio, o tratamento DOL+2GESSO, proporcionou aumento do teor de Ca^{2+} de aproximadamente duas vezes em relação ao DOL+GESSO. Diversos autores têm observado aumentos no teor de Ca^{2+} trocável na superfície com a aplicação de calcário mais gesso (CAMILO, 2007; BLUM *et al.*, 2013; INAGAKI *et al.*, 2016).

A aplicação da mistura calcário mais gesso aumentou em apenas 1 mmol_c dm⁻³ o teor de Mg^{2+} trocável aos 6 meses pós-plantio, na camada 0 - 10 cm (Figura 22 a). Aos 18 meses pós-plantio, nesta mesma camada, proporcionou aumento do teor de Mg^{2+} de aproximadamente três vezes em relação a coleta anterior. Os tratamentos DOL+2GESSO e DOL+GESSO apresentaram teores de 5,8 mmol_c dm⁻³ (Figura 22 b). BLUM *et al.* (2013) encontraram aumentos no teor de Mg^{2+} trocável nas camadas superficiais com aplicação de calcário mais gesso em Latossolo de textura média, cultivado com variedades agrícolas. RODRIGUEZ (2013) encontrou aumentos nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , na camada de 0 – 10 cm, com a aplicação de calcário dolomítico e gesso em povoamento de *Eucalyptus grandis* com 18 meses de idade plantado em Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média na região do cerrado em Minas Gerais. Aos 36 meses pós-plantio, o teor de Mg^{2+} foi de 8,1 mmol_c dm⁻³ no DOL+2GESSO, isto é, 580% maior do que o CONTROLE (Figura 22 c). CAIRES *et al.* (2011) registrou alta lixiviação de Mg^{2+} para as camadas mais profundas com a aplicação de gesso.

Figura 21. Teor de cálcio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de cálcio trocável acumulada na faixa de aplicação aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico, nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha^{-1} de Gesso Agrícola; DOL+GESSO - 2000 kg ha^{-1} de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha^{-1} de Gesso Agrícola; DOL+ 2GESSO - 2000 kg ha^{-1} de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha^{-1} de Gesso Agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

Figura 22. Teores de magnésio trocável aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de magnésio trocável acumulada na faixa de aplicação aos 6 (d), 18 (e) e 36 meses pós-plantio em Neossolo Quartzrênico, nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

A maior quantidade acumulada de Ca^{2+} e Mg^{2+} aos 18 meses, nos tratamentos com mistura de calcário e gesso (Figura 21, 22e), provavelmente foi influenciada pela maior precipitação pluvial entre outubro de 2014 e março de 2015 (Figura 3), consequentemente, maior movimentação destes cations no perfil, favorecido pela textura arenosa do solo, como também observado por CAIRES, (2000). A resposta da quantidade acumulada destes cations tanto aos 18 como aos 36 meses, nos tratamentos com doses de gesso, possivelmente foi devido ao efeito residual em longo prazo. FARINA et al. (2000) e BLUM et al., (2013) também constatarem resultados semelhantes.

A aplicação de gesso agrícola não influenciou o pH do solo, nem os teores de Al^{3+} trocável aos 6, 18 e 36 meses pós-plantio (Figura 23). Este comportamento foi similar ao relatado por CAIRES *et al.* (2011) em Latossolo Vermelho, sob sistema de plantio direto com culturas agrícolas. MORELLI *et al.* (1992) não observaram variações no pH e nos teores de Al^{3+} em doses crescentes de gesso, em LVA cultivado com cana de açúcar.

Após a aplicação do tratamento DOL+2GESSO houve pequena elevação do pH aos 6 meses na camada 0 – 20 cm (Figura 23a). Abaixo dos 30 cm de profundidade, o valor de pH foi similar entre todos os tratamentos no perfil de solo. Aos 18 meses, os tratamentos DOL+GESSO e DOL+2GESSO apresentaram maiores valores de pH em relação ao CONTROLE até 50 cm de profundidade (Figura 23b). Aos 36 meses, o DOL+2GESSO apresentou maiores valores de pH em relação ao CONTROLE na camada 0 - 30 cm (Figura 29c). Aos 6, 18 e 36 meses pós-plantio, o pH diminuiu com o aumento da profundidade.

Nos tratamentos em que foram realizadas a mistura calcário e gesso, houve diminuições dos teores de Al^{3+} trocável no perfil de solo em relação ao CONTROLE aos 36 meses pós-plantio (Figura 23f). Provavelmente, a formação do par iônico AlSO_4 ajudou a reduzir os teores de Al^{3+} , com a aplicação do gesso e calcário (ERNANI et al., 2007). OLIVEIRA; PAVAN (1994) encontraram reduções do Al^{3+} trocável abaixo dos 40 cm de profundidade depois de 3 anos da aplicação do calcário dolomítico. INAGAKI et al. (2016) observaram aumentos na fertilidade com o uso de calagem e gessagem, incluindo redução de Al^{3+} trocável e aumento na saturação por bases por culturas agrícolas no LVA.

Figura 23. pH em $CaCl_2$ aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e acidez trocável aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

Em termos comparativos, a quantidade fornecida de SO_4^{2-} no GESSO e CAL+GESSO foi 177 kg ha^{-1} , e no CAL+ 2GESSO foi 341 kg ha^{-1} . Em todos os tratamentos com gessagem ocorreram aumentos expressivos dos teores de SO_4^{2-} abaixo dos 40 cm, aos 6 meses pós-plantio. Aos 18 meses pós-plantio, o teor de SO_4^{2-} nos tratamentos GESSO e CAL+2GESSO foi superior ao CONTROLE no perfil de solo. Na camada 10 - 70 cm, o CAL+GESSO apresentou valores similares ao CONTROLE. Aos 36 meses, nos tratamentos GESSO, CAL+GESSO e CAL+2GESSO houve maiores valores de SO_4^{2-} em relação ao CONTROLE, exceto na camada 120 – 140 cm para o tratamento GESSO (Figura 24 c).

O ânion SO_4^{2-} deve ter-se movimentado para as camadas subsuperficiais acompanhado por cátions, como Ca^{2+} e Mg^{2+} (ALVAREZ et al., 2007, RAIJ 2008). A maior adsorção do SO_4^{2-} nas camadas subsuperficiais, devido à aplicação de maiores doses gesso, pode ser atribuída às cargas positivas do solo, que atraem os íons sulfato carregados negativamente (ALVAREZ et al., 2007). O efeito direto do pH na carga superficial está relacionado com o balanço entre adsorção ou dessorção de H^+ ou OH^- . Dessa maneira, a elevação ou a redução de pH promove, respectivamente, aumento de cargas positivas ou negativas no solo (ALVAREZ et al., 2007). Geralmente, nos horizontes subsuperficiais com pouca matéria orgânica, comum em Neossolos Quartzarênicos, o pH do solo está abaixo do ponto de carga zero, o que gera aumento relativo da quantidade de cargas negativas (BLUM et al., 2013; GONÇALVES et al., 2013).

Houve migração de K^+ em todos os tratamentos, incluído o CONTROLE, especialmente aos 18 e 36 meses pós-plantio (Figura 25). Contrário à afirmação de VILELA e RITCHEY (1985), não houve diminuição de K^+ trocável em camadas subsuperficiais. CAIRES et al. (2011) não observaram diferenças nos teores de K^+ trocável depois de 3 anos da aplicação de gesso em solo cultivado com culturas agrícolas. Aos 6 meses, comparados com os 18 e 36 meses, os valores de K^+ nos tratamentos, foram considerados baixos para o plantio de eucalipto. Isto pode ser devido pela quantidade fornecida na fertilização de base (GONÇALVES, 2010).

Figura 24. Teor de enxofre aos 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de enxofre acumulado na faixa de aplicação aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO – 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

Figura 25. Teores de potássio trocável 6 (a), 18 (b) e 36 (c) meses, e quantidade de potássio trocável acumulado na faixa de aplicação aos 6 (d), 18 (e) e 36 (f) meses pós-plantio no Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha^{-1} de Gesso Agrícola; DOL+GESSO - 2000 Kg ha^{-1} de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha^{-1} de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO - 2000 kg ha^{-1} de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha^{-1} de Gesso Agrícola. Valores representam a média de três repetições por tratamento. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$).

3.3.2. Balanço nutricional e absorção de nutrientes

No GESSO, DOL+GESSO e DOL+2GESSO o maior acúmulo de Ca foi na casca, seguida do lenho. O Mg^{2+} se acumulou em maior quantidade na casca, seguida do lenho. No S houve maior acúmulo no lenho, seguido da casca (Tabela 20).

Tabela 20. Acúmulo de Ca, Mg e S nos compartimentos aéreos das árvores de eucalipto nos tratamentos

Tratamento	Tronco		Copa		Total
	Lenho	Casca	Galho	Folha	
Ca (kg ha ⁻¹)					
CONTROLE	46,4 a	204 a	9,5 c	9,7 c	269,9
GESSO	57,9 a	206,3 a	21,3 a	10,6 c	296,1
DOL+GESSO	49,5 a	217,8 a	12,6 b	18,5 a	298,4
DOL+2GESSO	51,4 a	205,0 a	17,7 ab	16,3 b	290,4
Mg (kg ha ⁻¹)					
CONTROLE	17,4 c	36,0 a	4,6 c	6,3 c	64,3
GESSO	21,7 bc	37,2 a	8,2 a	6,6 c	73,7
DOL+GESSO	23,8 a	41,8 a	7,2 ab	8,7 b	81,5
DOL+2GESSO	23,4 ab	37,6 a	6,7 ab	9,1 a	76,8
S (kg ha ⁻¹)					
CONTROLE	11,6 a	2,4 a	0,6 a	2,1 a	16,7
GESSO	14,4 a	2,4 a	0,9 a	1,4 a	19,1
DOL+GESSO	14,9 a	2,7 a	0,9 a	2,7 a	21,2
DOL+2GESSO	14,8 a	2,2 a	1,0 a	2,3 a	20,3

Aos 30 meses foram observados valores similares nos tratamentos com gessagem em relação ao estoque na biomassa florestal. Pela maior quantidade de cálcio aplicado na mistura calcário dolomítico mais gesso, observa-se maior lixiviação deste nutriente (Tabela 21). A quantidade absorvida na parte aérea e radicular de magnésio foi similar nos tratamentos com gessagem com ou sem aplicação de magnésio (Tabela 22).

Tabela 21. Balanço nutricional de cálcio nos tratamentos com gessagem na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.

Tratamento	Quantidade de cálcio						
	Original	Aplicada	Atmosférico ⁽¹⁾	Absorvida ⁽²⁾	Trocável no solo	Lixiviada	Assimilado
	Kg ha ⁻¹						%
CONTROLE	28	0	24	271	33	0	521
GESSO	28	214	24	297	58	0	111
DOL+GESSO	28	645	24	298	50	349	43
DOL+2GESSO	28	832	24	290	82	512	33

⁽¹⁾ Para estimativa da deposição atmosférica foram utilizados os dados de Laclau et al. (2010). ⁽²⁾ Para estimativa da quantidade de cálcio absorvida na parte radicular foram tomados os dados de Mello (2004).

Tabela 22. Balanço nutricional de magnésio nos tratamentos com gessagem na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.

Tratamento	Quantidade de magnésio						
	Original	Aplicada	Atmosférico ⁽¹⁾	Absorvida ⁽²⁾	Trocável no solo	Lixiviada	Assimilado
	Kg ha ⁻¹						%
CONTROLE	12	0	10	64	12	0	290
GESSO	12	0	10	81	71	0	64
DOL+GESSO	12	86	10	81	15	12	75
DOL+2GESSO	12	86	10	77	27	4	71

⁽¹⁾ Para estimativa da deposição atmosférica foram utilizados os dados de Laclau et al. (2010). ⁽²⁾ Para estimativa da quantidade de cálcio absorvida na parte radicular foram tomados os dados de Mello (2004).

Nos tratamentos que foi fornecido a maior quantidade de enxofre maior foi a retenção no solo. A quantidade lixiviada foi similar. A taxa de assimilação diminuiu com o maior fornecimento de enxofre (Tabela 23).

Tabela 23. Balanço nutricional de enxofre nos tratamentos com gessagem na camada 0- 160 aos 30 meses de idade.

Tratamento	Quantidade de enxofre						
	Original	Aplicada	Atmosférico	Absorvida	Trocável no solo	Lixiviada	Assimilado
	Kg ha ⁻¹						%
CONTROLE	173	72	10	17	67	171	7
GESSO	173	237	10	19	225	176	5
DOL+GESSO	173	237	10	21	230	169	5
DOL+2GESSO	173	400	10	20	390	173	3

Os teores foliares de Ca, Mg, K e S encontraram-se dentro da faixa adequada nas três datas de amostragem (GONÇALVES, 2010), exceto para o teor foliar de Mg aos 18 meses pós-plantio, o qual foi levemente abaixo da faixa adequada e, o teor foliar de K, aos 6 meses, o qual ficou acima da faixa adequada. Os teores foliares de Ca aumentaram entre 6 e 18 meses, e diminuíram aos 30 meses pós-plantio (Tabela 24). Nos tratamentos com gessagem, os teores foliares de Ca aumentaram, entre 6 e 18 meses de idade das árvores (Tabela 24). Aos 18 meses, a maior quantidade de Ca²⁺ trocável fornecida aumentou levemente os teores deste nutriente na folha. RODRIGUEZ (2013) encontrou reduções no teor de Ca foliar no tratamento em que não houve aplicação de Ca, aos 18 meses de idade de povoamentos de eucalipto. SILVA et al. (2013) observaram que os processos fisiológicos podem mudar dentro das árvores e influenciar a dinâmica da concentração foliar dos nutrientes testados.

Os teores foliares de Mg²⁺ diminuíram entre 6 e 18 meses pós-plantio, voltando a aumentar aos 30 meses. Aos 6 meses, não foram observadas diferenças entre as fertilizações quanto ao teor de Mg²⁺ foliar. Comparado ao CONTROLE, o teor foliar de Mg²⁺ no GESSO

foi 12% menor e, no CAL+2GESSO, 6% menor. Provavelmente, o menor teor foliar apresentado para o Mg^{+} aos 18 meses foi devido ao antagonismo com a absorção de Ca e K. NOVAIS et al. (1990) comentaram que a baixa demanda de Mg pelo eucalipto faz com que a relação Ca/Mg trocáveis adequada para seu crescimento seja bastante ampla.

Os teores foliares de K^{+} diminuíram expressivamente entre 6 e 18 meses pós-plantio (Tabela 24). Aos 6 meses, não houve diferenças entre os tratamentos. Aos 18 meses o tratamento GESSO e DOL+2GESSO apresentaram teor foliar de K^{+} 16% superior ao CONTROLE. O DOL+GESSO foi 8% superior. Os teores foliares de S apresentaram comportamento similar aos de K^{+} , com diminuição entre 6 e 30 meses. Aos 18 meses, no CAL+GESSO houve aumento de 22% em relação ao CONTROLE. Aos 30 meses o CAL+GESSO apresentou diminuição de 22% e, o GESSO, 33% em relação ao CONTROLE.

Tabela 24. Análise foliar de *Eucalyptus urophylla* aos 6, 18 e 30 meses pós-plantio nos tratamentos.

Tratamentos	Ca			Mg			K			S		
	6	18	30 m	6	18	30 m	6	18	30 m	6	18	30 m
	$g\ kg^{-1}$											
CONTROLE	4,1b	4,4b	4,5a	2,7b	1,8a	2,9a	10,5a	6,1b	5,0b	1,1 b	0,9a	0,9 a
GESSO	4,5 a	5,0 a	4,3a	2,9 bc	1,6b	2,8b	11,1 a	7,1 a	6,1 a	1,5 a	0,9 a	0,6 b
DOL+GESSO	4,4ab	5,3ab	4,3a	3,1 a	1,9a	3,1a	10,1a	6,6 a	5,3bc	1,3 ab	1,1a	0,7bc
DOL+2GESSO	4,9 a	5,4 a	4,4a	3,0 bc	1,7b	2,7b	10,7 a	7,1 a	5,9 ab	1,3 a	0,9 b	0,9ab

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)

3.3.3. Distribuição de raiz fina no perfil e umidade do solo

Houve tendência de menores valores de densidade de raízes finas em todas as épocas de coleta nos tratamentos com aplicação de gesso, exceto para o DOL+2GESSO na camada 0 – 10 cm (Figura 26). Aos 10 meses pós-plantio, o DOL+2GESSO apresentou menores valores em relação ao CONTROLE na camada 10 – 60 cm (Figura 26a). O DOL+GESSO apresentou diferenças significativas somente na camada 20 – 40 cm. O GESSO teve um comportamento similar ao CONTROLE. A aplicação de gesso e calcário não aumentou a DRF nas camadas superficiais e subsuperficiais (Figura 26). Aos 10 meses pós-plantio, o comportamento foi variável ao longo do perfil do solo, sendo que, comparados com o CONTROLE, na camada 0-10 cm, os menores valores foram observados no GESSO, na camada 10 – 20 cm, no DOL+2GESSO e, na camada 20 – 40 cm, no dol+GESSO. Nesta idade foram encontrados baixos teores de água no solo até a profundidade de 60 cm. Os teores de umidade no solo nos tratamentos DOL+GESSO e DOL+2GESSO variaram entre 3 e 11 %. A DRF alcançou horizontes muito mais profundos que os amostrados, absorvendo quantidades extras de água (LACLAU *et al.*, 2013).

Aos 18 meses não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos no perfil de solo, exceto para o GESSO na camada 0 – 10 cm (Figura 26 b). Aos 6 e 18 meses pós-plantio, não foram observadas diferenças na umidade dos tratamentos ao longo do perfil do solo (Figura 33 ab). Resultados semelhantes foram encontrados por RODRIGUES (2013) em povoamento de *Eucalyptus grandis*, em solo de textura média, na região do Cerrado em Minas Gerais. A maior DRF no CONTROLE, aos 36 meses pós-plantio, na camada superficial do solo, provavelmente se deve à baixa disponibilidade de nutrientes, induzindo as árvores a alocarem maior quantidade de fotoassimilados em raízes. E, assim, conseguirem aumentar seus aportes de água e nutrientes (LAMBAIS, 2015). A precipitações pluviométricas em setembro de 2016 (Figura 2) e a umidade no solo (Figura 27) para a época de amostragem pode ter influenciado na DRF. Por este motivo, a atividade das raízes finas tem alta influência na dinâmica hídrica (HINSINGER *et al.*, 2009), sendo o eucalipto uma espécie que rapidamente desenvolve seu sistema radicular nas camadas profundas do solo (CHRISTINA *et al.*, 2011).

Figura 26. Densidade de raiz fina no perfil de solo aos 6 (a), 18 (b) e 33 (c) meses e quantidade acumulada de raiz fina em área total aos 6 (d), 18 (e) e 30 (f) meses pós-plantio no Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 Kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. As barras horizontais representam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$).

Figura 27. Teor de água no solo aos 6 (a), 18 (b) e 33 (c) meses pós-plantio em Neossolo Quartzarênico nos tratamentos: CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. As barras horizontais representam LSD ($\alpha = 0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha = 0,05$).

Aos 33 meses, na camada 0 – 10 cm, o CONTROLE apresentou aumento expressivo na DRF em relação ao DOL+2GESSO (928%), GESSO (492%) e DOL+GESSO (361%). Na camada 10 – 20 cm, o DOL+2GESSO apresentou diminuição de 58% da DRF. Na camada 40 – 60 cm, o GESSO apresentou diminuição de 49 % da DRF em relação ao CONTROLE (Figura 26 c). No CONTROLE, houve a maior quantidade de raiz acumulada em todas as datas de amostragem no perfil de solo, sendo, aos 33 meses pós-plantio, a diferença mais expressiva. Nesta época, na umidade do solo houve diferenças no perfil do solo, exceto na camada 0 – 10 cm. Na camada 10 - 160 cm, no DOL+2GESSO, ocorreram maiores valores de umidade no solo comparado ao CONTROLE. Na camada 20 – 40 cm, todos os tratamentos diferiram entre si e, na camada 100 – 160, o GESSO também apresentou maiores valores de umidade em relação ao CONTROLE (Figura 27 c).

3.3.4. Crescimento das árvores

Os tratamentos influenciaram o crescimento em altura ao longo do tempo ($p < 0,05$), exceto para a avaliação de 7 e 20 meses pós-plantio (Figura 28a). O CONTROLE apresentou os menores valores de altura e DAP desde os 7 meses de idade. O CAL+2GESSO apresentou alturas superiores aos 11 (4%), 30 e 38 meses (7%) em relação ao CONTROLE. O CAL+GESSO apresentou alturas superiores aos 30 e 38 (7%) em relação ao CONTROLE (Figura 28a). O DAP foi diferente entre os tratamentos ($p < 0,05$) (Figura 28b). O CAL+GESSO e CAL+2GESSO apresentaram valores superiores aos 7 (49%), 11 (15%) e 20 meses (10%), em relação ao CONTROLE. No CAL+2GESSO, o DAP foi 3% superior ao CONTROLE, aos 30 e 38 meses (Figura 28b).

Figura 28. Altura do tronco (a) e diâmetro à altura do peito (DAP) (b) de árvores de *E. urophylla*, nos tratamentos CONTROLE – Controle, sem aplicação de cálcio; GESSO – 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 1200 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola; DOL+2GESSO - 2000 kg ha⁻¹ de Calcário dolomítico misturado com 2400 kg ha⁻¹ de Gesso Agrícola. As barras verticais indicam LSD ($\alpha=0,05$). ns – diferença não significativa (teste F, $\alpha=0,05$).

Os tratamentos diferiram entre si quanto ao volume do tronco, aos 38 meses pós-plantio (Tabela 25). O tratamento GESSO apresentou aumento de 4% no volume do tronco, seguido do DOL+GESSO com 6% e DOL+2GESSO com 9% (Tabela 25). RODRIGUES et al., (2016) encontraram um ganho médio de 96% no volume de fuste com aplicação de 2,4 t ha⁻¹ de calcário dolomítico mais 1 t ha⁻¹ de gesso, comparado à ausência de aplicação de Ca em LVA de textura média.

O aumento na dose de CaO resultou em um aumento linear do volume do tronco ($r^2=0,93$), mostrando ser um clone altamente responsivo à aplicação de Ca²⁺ (Tabela 21). No CONTROLE, o IMA aos 38 meses foi de 45 m⁻³ ha⁻¹ ano⁻¹, apesar dos teores de Ca²⁺ no solo serem considerados baixos (Figura 27 c). O povoamento acumulou em média 269 kg ha⁻¹ de Ca na parte aérea das plantas. Provavelmente, a maior parte deste Ca foi absorvida da forma trocável do solo. No CAL+2GESSO, houve um IMA de 49 m⁻³ ha⁻¹ ano⁻¹. O acúmulo na parte aérea da planta foi de 290 kg ha⁻¹ de Ca. RODRIGUES (2013) observou nos tratamentos com mistura de calagem + gessagem valores de produção volumétrica muito menores comparativamente aos encontrados neste estudo. O índice PV50 entre os tratamentos da gessagem variou entre 46,9% e 47,4%, indicando para estes tratamentos uma floresta homogênea.

Tabela 25. Volume do tronco com casca dos povoamentos clonais de *E. urophylla* em função da idade nos tratamentos com dose de gesso.

Tratamento	Volume	
	30º mês	38º mês
	m ³ ha ⁻¹	
CONTROLE	116 a	143 c
GESSO	118 a	148 bc
DOL+GESSO	120 a	151 ab
DOL+2GESSO	123 a	156 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)

Os tratamentos diferiram na produção de biomassa aérea total (Tabela 26). No DOL+2GESSO houve aumento de 28%, no DOL+GESSO de 26% e, no GESSO de 22% em relação ao CONTROLE. Não se observaram diferenças entre os tratamentos quanto aos compartimentos casca e galho. Para o lenho, o DOL+2GESSO foi 32 % mais produtivo, para o DOL+GESSO 27% e para o GESSO 25%. A biomassa de folha nos diferentes tratamentos foi 50% superiores ao CONTROLE (Tabela 26).

Tabela 26. Biomassa aérea e densidade de tronco de *Eucalyptus urophylla* aos 30 meses nos tratamentos com gessagem.

Tratamento	Lenho	Casca	Galho	Folha	Total	Densidade do tronco
	Mg ha ⁻¹					g cm ⁻³
CONTROLE	65 b	14 a	3 a	2 b	84 b	0,68 b
GESSO	81 a	14 a	5 a	3 a	103 a	0,80 a
DOL+GESSO	83 a	15 a	5 a	3 a	106 a	0,82 a
DOL+2GESSO	86 a	13 a	6 a	3 a	108 a	0,80 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste LSD ($\alpha=0,05$)

4. CONCLUSÕES

- I. A aplicação de gesso agrícola não promoveu aumentos dos teores de Ca^{2+} e nem da densidade de raiz fina na subsuperfície do solo. O volume de madeira do eucalipto com a aplicação de gesso foi menor relativamente aos tratamentos que receberam outras fontes de cálcio.
- II. A aplicação do calcário dolomítico em faixa foi mais eficiente do que a aplicação em área total com o fim de aumentar a disponibilidade de Ca^{2+} e Mg^{2+} no perfil de solo.
- III. A incorporação de calcário dolomítico no solo diminuiu os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} no perfil de solo. A produtividade de madeira foi maior com a não incorporação do calcário dolomítico.
- IV. A aplicação combinada de calcário dolomítico e gesso foi mais efetiva para aumentar teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} SO_4^{2-} e produtividade do eucalipto do que a aplicação isolada de gesso.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, V.; RIBEIRO, A.; GUIMARÃES, T. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Viçosa: CFSEMG, 1999. 322 p.
- ALVAREZ V., V. H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C. H.; PEREIRA, N. F. Enxofre. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.) Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, 2007. p. 595-644.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENETELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPOAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711 - 728, 2013.
- AULER, A.C.; PIRES, L.F.; DOS SANTOS, J.A.B.; CAIRES, E.F.; BORGES, J.A.R.; GIAROLA, N.F. Effects of surface-applied and soil-incorporated lime on some physical attributes of a Dystrudept soil. **Soil Use and Management**, Malden, 33, p 129 – 140, 2017.
- BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (Eds.) Relação solo-eucalipto. Viçosa: UFV, 1990. p. 127-186.
- BELLENGIERI, P.A.; SOUZA, E.C.A.; ALCARDE, J.C.; SHIKASHO, H.W. Impotancia da reatividade do calcário sobre a produção e algumas características da cultura da soja. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.49, n.1, p. 61 – 71, 1992.
- BELLOTE, A.; SILVA, H. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de Eucalyptus spp. Em GONÇALVES, J. L. M, BENEDETTI V. eds. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba, IPEF, 2000. p. 105-166.
- BLUM, S.A.; CAIRES, E.F.; ALLEONI, L.F.R. Lime and phosphogypsum application and sulfate retention in subtropical soils under no-till system. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v 13 (2), p. 279-300, 2013.
- BLUM, S.A.; GARBUIO, F.J.; JORIS, H.A.; CAIRES, E.F. Assessing available soil Sulphur from phosphogypsum applications in a no-till cropping system. **Experimental Agriculture**, New York, v. 50, p. 516-532, 2014.
- BLOOM, A. J.; CHAPIN F.S.; MOONEY, H. A. 1985. Resource Limitation in Plants - an Economic Analogy. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto – CA, 16: 363-392.
- BOUILLET, J. P.; LACLAU, J. P.; ARNAUD, M.; M'BOU, A. T.; SAINT-ANDRÉ, L.; JOURDAN, C. et al. Changes with age in the spatial distribution of roots of a Eucalyptus

- clone in the Congo. Impact on water and nutrient uptake ability. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, 171: 43-57, 2002.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3.ed. PortoAlegre: Bookman, 2013. 704p.
- CAIRES, E. F. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto: experiências no Estado do Paraná. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, Fertbio, Santa Maria-RS, SBCS, 2000. CD-ROM.
- CAIRES, E.F.; BANZATTO, D.A.; FONSECA, A.F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa v.24:161-169, 2000.
- 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. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa v.27:275-286, 2003.
- CAIRES, E.F.; MASCHIETTO, E.H.; GARBUIO, F.J.; CHURKA, S.; JORIS, H.A. Surface application of gypsum in low acidic Oxidic under no-till cropping system. **Scientia Agriola**, Piracicaba, v.68, n.2, p. 209 – 216, 2011.
- CASSOL, L.C. Características físicas e químicas do solo e rendimento de culturas após a reaplicação de calcário, com e sem incorporação, em sistemas de preparo. 1995. 98f. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.
- CAMILO, N. Produtividade do cafeeiro em resposta ao manejo da calagem em latossolo de cerrado. 2007. 93f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.
- CHRISTINA, M.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J.P. Almost symetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. **Ecosphere**, Washington, v. 2, n. 3, p. 1 – 10, 2011.
- CIOTTA, M.N.; BAYER, C. ERNANI, P.R.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J.A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 317 – 326, 2004.
- ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; DOS SANTOS, F. C.; Potassio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.) Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, 2007. p. 552-594.
- FARINA, M.P.W., CHANNON, P. THIBAUD, G.R. Acomparison of strategies for amelioration subsoil acidity: II Long-term soil effects. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64: 652-658, 2000.

- FLORA, L. Influência da calagem na mobilidade de cátions básicos e na disponibilidade de nutrientes. 2006. 69f. Dissertação. Universidade do Estado de Santa Catarina, 2006.
- FLORENCE, R.G. Ecology and Silviculture of Eucalypt Forests. Australia. CSIRO, 2007. 413p.
- GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A. G.; GAVA, J. L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (eds). Nutrição e fertilização de florestal. Piracicaba, IPEF, 2000. p 1 - 57.
- GONÇALVES, J. L. M.; MELLO, S. L. M. The root system of trees. In: GONÇALVES, J. L. M, BENEDETTI V. eds. Forest Nutrition and Fertilization. Piracicaba, IPEF, 2004. p. 223-267.
- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests**, Grahamstown, v. 70, p. 105-118, 2008.
- GONÇALVES, J.L.M. Eucalipto In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R.. (Org.). Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. 1ed.Piracicaba: IPNI, 2010, v. 1, p. 309-369.
- GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J.P.D.; LACLAU, J.P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.301, p. 6 - 27, 2013.
- GOMES, S. Efeitos do alumínio e mecanismos de tolerância à toxicidade em espécies de Eucalyptus e Pinus. 2001. 39f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 2001.
- GREEN, J.J.; DAWSON, L.A.; PROCTOR, J.; DUFF, E.I.; ELSTON, D.A. Fine root dynamics in a tropical rain forest is influenced by rainfall. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 276: p. 23-32. 2005
- IBA, 2016. Brasília: GWA, 2016. 96 p. Relatório Anual 2016.
- INAGAKI, T.; SÁ J. C.; CAIRES, E.; GONÇALVES, D. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Zurich, v. 231: p. 156 – 165. 2016.

- HAKAMADA, R.E.; Uso do inventário florestal como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural de povoamentos clonais de *Eucalyptus*. 2012. 115 p. (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- HINSINGER, P.; BENGOUGH, A.G.; VETTERLEIN, D.; YOUNG, I.M. Rhizosphere: Biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. **Plant Soil**, Dordrecht , 321: 117–152. 2009.
- IPEF. Nutrição e fertilização com enxofre e uso de gesso em plantações de eucalipto. Piracicaba: IPEF, n. 208, dez 2015. 15 p.
- KOCHIAN, L.V.; PENCE, N. S.; LETHAM D, L. D.; PIÑEROS, M.A.; MAGALHÃES, J. V.; HOEKENGA, O. A.; GARVIN, D.F. Mechanisms of metal resistance in plants: aluminum and heavy metals. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 247:109 – 119, 2002.
- LACLAU, J.P.; LEVILLAIN, J.; DELEPORTE, P.; NZILA, J.D.; BOUILLET, J.P.; SAINT-ANDRÉ, L.; VERSINI, A.; MARESCHAL, L.; NOUVELLON, Y.; THONGO, M’BOU A.; RANGER, J. Organic residue mass at planting is an excellent predictor of tree growth in *Eucalyptus* plantations established on a sand tropical soil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 260, p. 2148-2159, 2010.
- LACLAU, J-P.; DA SILVA, E.A.; RODRIGUES LAMBAIS, G.; BERNOUX, M.; LE MAIRE, G.; STAPE, J.L.; BOUILLET, J-P.; GONÇALVES, J.L.M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne v. 4: 243 – 255, 2013.
- LAMBAIS, G. Produção e mortalidade de raízes finas em plantações de *Eucalyptus grandis* cultivados em Latossolos. 2015. 141f. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, 2015.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, A.S. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.
- MARENGO, J.A.; ALVES, L.M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **Geosp - Espaço e Tempo**. v. 19, p. 485-494, 2016.
- MARSCHNER, P. Mineral Nutrition of Higher Plants. 3 ed. London, Academic Press. 2012. 651p.

- MELO, E.A.S. Nutrição e fertilização de plantações clonais de eucalipto sob diferentes condições edafoclimáticas. 2014. 186f Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, 2014.
- MELLO, S. Dinâmica de raízes finas e aporte de carbono no solo sob povoamentos de *eucalyptus grandis* no estado de São Paulo. 2004. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, 2004.
- MENDONÇA, E.S.; ROWELL, D.L. Dinâmica do alumínio e de diferentes frações orgânicas de um latossolo argiloso sob cerrado e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, p.295-303, 1994.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. & SANTOS, J.C.F. Effects of addition of crop residues on the leaching of Ca and Mg in Oxisols. In: International symposium on plant soil interactions at low pH, 4., Belo Horizonte, 1996. Abstracts. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/ EMBRAPA-CPAC, 1996. p.8.
- MORELLI, J. L.; DALBEN, A. E.; DEMATTÊ, J. L. I. Calcário e gesso na produtividade de cana de açúcar e nas características químicas de um latossolo de textura média, álico. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Campinas, 187 – 94. 1992.
- MOTTA, A. C. V. ; MELO, V. F. Química dos solos ácidos. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. (Org.). Química e mineralogia do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, v. 2, p. 313-380.
- NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Nutrição mineral do eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F., ed. Relação solo-eucalipto. Viçosa: Editora Folha de Viçosa, 1990. cap.2, p.25-98
- NEVES, J.C. Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo. 2000. 202f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2000.
- PAVAN, M.A. Movimentação de calcário no solo através de técnicas de manejo da cobertura vegetal em pomares de macieira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.16, p.86-91, 1994.
- PEREIRA, A.R.; BARROS, N.F.; ANDRADE, D.C.; CAMPOS, P.T.A. Concentração e distribuição de nutrientes em *Eucalyptus grandis*, em função da idade, cultivado na região do cerrado. **Brasil Florestal**, Brasília, v. 8, p.27-37, 1984.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 284p.

- RAIJ, B. van, **Gesso na Agricultura**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronomico de Campinas, 2013. 233 p.
- RAMOS, B.Z.; TOLEDO, J.P.; LIMA, J.M.; SERAFIM, M.E.; BASTOS, A.R.; GUIMARÃES, P.T. GONTIJO, C.A. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v 37(4), 1018-1026, 2013.
- REEVE, N.G.; SUMNER, M.E. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface applied amendments. **Agrochemophysica**, v. 4: 1-6. 1972.
- RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L.C.; BORTOLUZZI, E.C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa* v. 24, p. 797-805, 2000.
- ROCHA, J. B. O.; POZZA, A. A. A.; CARVALHO, J. G.; SILVA, C. A.; CURI, N. Efeito da calagem na nutrição mineral e no crescimento inicial do eucalipto a campo em Latossolo húmico da Zona da Mata (MG). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 80, p. 255-263, 2008.
- ROCHA, J. H. T.; GONÇALVES, J. L. M.; GAVA, J. L. ; GODINHO, T. ; MELO, E A.S.C. ; BAZANI, J.H.; HUBNER, A.; ARTHUR J.; WICHERT, M. P. Forest residue maintenance increased the wood productivity of a Eucalyptus plantation over two short rotations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam v. 379, p. 1-10, 2016.
- RODRIGUES, F. Crescimento de eucalipto em idade jovem e movimentação de cálcio e magnésio no solo em resposta à aplicação de calcário e gesso agrícola. 2013. 85f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, SP, 2013.
- RODRIGUES, F.; ALVAREZ V, V. H.; BARROS, N.; SILVA, I.; NEVES, J. C. L. Produtividade de eucalipto 18 meses de idade, na região do Cerrado, em resposta à aplicação de cálcio, via calcário e gesso agrícola. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 44, n 109 p. 67 – 74. 2016.
- SANTANA, R.; BARROS, N.; NOVAIS, R.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 32, p. 2723-2733, 2008.
- SCOLFORO, J.R.S.; THIERSCH, C.R. **Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. 285p.

- SILVA, C.A.; VALE, F.R.; ANDERSON, S.J.A.; KOBAL, A.R. Mineralização de nitrogênio e enxofre em solos brasileiros sob influência da calagem e fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34: 1679 – 1689, 1999.
- SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V. H. et al. (Eds.). Fertilidade do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Viçosa-MG, 2007. Cap. 6, p. 275-374.
- SILVA, R.; GIULIETTI M. Fosfogesso: Geração, Destino e Desafios. Em: OLIVEIRA, J.; FERNANDEZ, F.; CASTILHOS, S. (eds). Agrominerais para o Brasil. Rio de Janeiro: CETEM; MCT, 2010. p 125 - 144.
- SILVA, E.; BOUILLET, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; JUNIOR, C.; TRIVELIN, P.; HINSINGER, P.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y.; STAPE.; LACLAU, J.P. Functional specialization of Eucalyptus fine roots: constraining potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracer at varying soil depths. **Functional Ecology**, London, v. 25, p. 996 – 1006. 2013.
- SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Nutrição e produtividade de grãos da aveia-preta em função da aplicação de calcário e gesso em superfície na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32: 715-725, 2008.
- SOUSA, D.; MIRANDA, L.; OLIVEIRA, S. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V. H. et al. (Eds.). Fertilidade do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Viçosa-MG, 2007. Cap 5, p. 205-274.
- SMETHURST, J.P. Forest fertilization: Trends in knowledge and practice compared to agriculture. **Plant and Soil**, Crawley, v. 335, n. 1, p. 83 – 100, 2009.
- STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193:17-31, 2004.
- TAKASU, E., YAMADA, F., SHIMADA, N., KUMAGAI, N., HIRABAYASHI, T., SAIGUSA, M. Effect of phosphogypsum application on the chemical properties of Andosols, and the growth and Ca uptake of melon seedlings. **Soil Science and Plant Nutrition**. Tokyo, v. 52, 760 – 768. 2006.
- TAIZ. L.; ZEIGER. E. Plant Physiology. Fifth Edition. Sinauer Associates, Inc. Sunderland, 2010. 782 p.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER J.R. The water balance. **Publications in Climatology**, New Jersey, v.8 p. 1 – 104, 1955.

- VILELA, L.; RITCHEY, K.D. Potassium in intensive cropping systems on highly weathered soils. In: MUNSON, R.D., ed. Potassium in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1985. p.1155-1199.
- VITTI, G.; LUZ, P.; MALAVOLTA, E.; DIAS, A.; SERRANO, C. Uso do gesso em sistemas de produção agrícola. Piracicaba: Gape, 2008. 104p.
- WILKINS A. P.; HORNE, R. Wood-density variation of young plantation-grown *Eucalyptus grandis* in response to silvicultural treatments. **Forest Ecology Management**, v.40, p.39-50, 1991.
- ZAMBROSI, F.C.; ALLEONI, L.R.; CAIRES, E. Teores de alumínio trocável após calagem e gessagem em latossolo sob sistema plantio direto. *Bragantia*. Campinas v. 66, n.3, p. 487 – 495. 2007.
- ZOBEL, B. Silvicultural effects on wood properties. *IPEF International*, n.2, p.31-38, 1992