UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Grasiele Dick

FERTILIZAÇÃO MINERAL EM *Eucalyptus dunnii* Maiden: EFEITOS NOS ESTOQUES DOS NUTRIENTES

Santa Maria, RS
2018

Grasiele Dick

FERTILIZAÇÃO MINERAL EM *Eucalyptus dunnii* Maiden: EFEITOS NOS ESTOQUES DOS NUTRIENTES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutora em Engenharia Florestal.**

Orientador: Prof. Dr. nat. techn. Mauro Valdir Schumacher

Santa Maria, RS
2018

Dick, Grasiele
FERTILIZAÇÃO MINERAL EM Eucalyptus dunnii Maiden: EFEITOS NOS ESTOQUES DOS NUTRIENTES / Grasiele Dick.- 2018.
96 p.; 30 cm

Orientador: Mauro Valdir Schumacher
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2018

1. Nutrição florestal 2. Ciclagem de nutrientes 3. Produtividade 4. Biomassa florestal 5. Balanço nutricional I. Schumacher, Mauro Valdir II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

©2018

Todos os direitos autorais reservados a Grasiele Dick. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante citação da fonte. E-mail: grasidick@hotmail.com

Grasiele Dick

FERTILIZAÇÃO MINERAL EM *Eucalyptus dunnii* Maiden: EFEITOS NOS ESTOQUES DOS NUTRIENTES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutora em Engenharia Florestal.**

Aprovado em 23 de fevereiro de 2018:

Mauro Valdir Schumacher

Mauro Valdir Schumacher, Dr. nat. techn. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Marcos Vinicius Winckler Caldeira, Dr. (UFES)

Eleandro José Brun

Eleandro José Brun, Dr. (UTFPR)

Márcio Viera

Márcio Viera, Dr. (UFSM)

Hamilton Vogel

Hamilton Luiz Munari Vogel, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2018

AGRADECIMENTOS

Ao Engenheiro Florestal Professor Titular Dr. nat. techn. Mauro Valdir Schumacher pelos ensinamentos, paciência, incentivo e tempo despendido na orientação deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal. Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos durante o período do doutorado.

À empresa CMPC Celulose Riograndense, na pessoa do Engenheiro Florestal Elias Frank de Araújo, pela confiança, disponibilidade da área experimental, pelo apoio financeiro, operacional e logístico.

Aos colegas e amigos da Universidade Federal de Santa Maria, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do curso de Engenharia Florestal e do Laboratório de Ecologia Florestal, em especial ao Dione Richer Momolli, pelo companheirismo e por todo auxílio na coleta e processamento dos dados, e aos demais colegas, Aline Aparecida Ludvichak, Gian Carlos Poleto, Huan Pablo de Souza, Claudinei Garlet e Rudi Witschoreck.

Ao meu pai Airton e minhas irmãs Angélica e Rafaela, que sempre apoiaram, acreditaram e incentivaram a conquista dos meus objetivos. Apesar de todas as dificuldades, vocês foram a minha maior motivação para enfrentar todos os desafios, especialmente durante a graduação e pós-graduação. Eu amo muito vocês!

Ao Mauro, meu amor e companheiro de vida, minha fonte de inspiração e calmaria, agradeço pelo incentivo, motivação e por compartilhar comigo desta caminhada, apesar de todas as dificuldades, sempre nos mantemos firmes e fortes.

Ao Odin e ao Ozzy, meus filhotes amados, que em todos os momentos preencheram minha vida com amor e companheirismo.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, muito obrigada!

RESUMO

FERTILIZAÇÃO MINERAL EM *Eucalyptus dunnii* Maiden: EFEITOS NOS ESTOQUES DOS NUTRIENTES

AUTORA: Grasiele Dick
ORIENTADOR: Dr. nat. techn. Mauro Valdir Schumacher

Aprimorar o manejo da fertilização mineral é essencial e imprescindível à manutenção da capacidade produtiva e sustentabilidade nutricional dos solos, destinados a silvicultura com espécies arbóreas de rápido crescimento. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes recomendações de fertilização mineral nos estoques de nutrientes no solo, na produtividade, produção de biomassa, alocação de nutrientes e carbono, além de estimar o balanço nutricional (BN) em plantação de *Eucalyptus dunnii*. O estudo foi desenvolvido no sítio Ponta das Canas, São Gabriel, Rio Grande do Sul, Brasil. Aos 14 meses de idade, delimitou-se uma área de 0,54 ha do talhão, que foi subdividida em nove unidades amostrais de 20 m x 30 m cada, onde foram adicionadas, de forma casualizada, três repetições de diferentes recomendações de fertilizante N-P_2O_5-K_2O (24:00:24), em cobertura, que consistiram nos tratamentos T1 = fertilização padrão (150 g planta^{-1}); T2 = fertilização padrão + 50% da mesma dose (225 g planta^{-1}) e T3 fertilização padrão + 200% da mesma dose (450 g planta^{-1}). Aos 14 e 36 meses pós-plantio, foram coletadas amostras de solo em até 80 cm de profundidade e pode-se constatar que o pH era ácido e os teores de Ca e Mg são baixos e muito baixos. A recomendação T3 aliada aos efeitos residuais da calagem e da adubação pré-plantio, promoveu aumento nos teores e estoques de nutrientes do solo, especialmente de K, P, Ca e Mg. As avaliações da produtividade, produção de biomassa, acúmulo de C e nutrientes, indicaram que, até os 36 meses de idade do *Eucalyptus dunnii*, a aplicação da recomendação T3 promoveu maior altura das árvores e, em função desta variável, houve aumento no volume por árvore, em comparação ao T1, no entanto, o DAP não diferiu entre tratamentos. A quantidade média de biomassa e carbono foi de 58,7 Mg ha^{-1} e 26,9 Mg ha^{-1}, respectivamente. Ambos não variaram em função dos tratamentos e a tendência de acúmulo de biomassa foi: madeira do tronco > galhos > casca do tronco > folhas. As concentrações dos nutrientes variaram entre os componentes das árvores, com maiores valores nas folhas e menores na madeira do tronco e as recomendações de fertilização não influenciaram as concentrações de macronutrientes. Na biomassa total, ocorreu um acúmulo médio de 175,8; 25,4; 198,4; 231,6; 75,1 e 17,2 kg ha^{-1} de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente. Para o B, Cu, Fe, Mn e Zn, as quantidades médias foram de 391,5; 143,0; 2064,2; 12694,8 e 471,5 g ha^{-1}, respectivamente. As entradas de nutrientes via precipitação pluviométrica incidente (Pt) também foram avaliadas e quantidades expressivas de nutrientes foram incorporadas pela solução aquosa, cuja sequência de aporte foi K > S > Ca > N > Mg. Estas entradas poderiam reduzir a adição de 22% e 11% das doses de K e N, respectivamente, aplicadas na fertilização de pré-plantio. O balanço nutricional, considerando o cenário de remoção da madeira do tronco de *Eucalyptus dunnii*, é positivo para os nutrientes N, P e K e negativo para Ca, Mg e S, em todos os tratamentos. De acordo com os resultados encontrados, especialmente sobre a produtividade e biomassa, visando a redução de custos operacionais e impactos ambientais, a fertilização padrão (150 g planta^{-1} de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24), em cobertura, pode ser recomendada para plantações de *Eucalyptus dunnii* em condições de sítio semelhantes ao presente estudo.

Palavras-chave: Nutrição florestal; ciclagem de nutrientes; produtividade; biomassa florestal; balanço nutricional.

ABSTRACT

MINERAL FERTILIZATION IN *Eucalyptus dunnii* Maiden**: EFFECTS IN NUTRIENT STOCKS**

AUTHOR: Grasiele Dick
ADVISER: Dr. nat. techn. Mauro Valdir Schumacher

Improving the management of mineral fertilization is essential to the maintenance of productive capacity and nutritional sustainability of soils destined to forestry with fast growing tree species. The objective of this study was to evaluate the effects of different mineral fertilization recommendations on soil nutrient stocks, productivity, biomass production, nutrient and carbon allocation, and estimate the nutritional balance (NB) in *Eucalyptus dunnii*. The study was developed at the Ponta das Canas site, São Gabriel, Rio Grande do Sul, Brazil. At 14 months of age, an area of 0.54 ha of the plot was delineated, which was subdivided into nine sample units of 20 m x 30 m each, in which were randomly added three replicates of different recommendations of N- P_2O_5-K_2O (24:00:24), in coverage, which consisted of treatments T1 = standard fertilization (150 g plant^{-1}); T2 = standard fertilization + 50% of the same dose (225 g plant^{-1}) and T3 standard fertilization + 200% of the same dose (450 g plant^{-1}). At 14 and 36 months after planting, soil samples were collected up to 80 cm deep and it can be seen that the pH was acid and the Ca and Mg contents were low to very low. The recommendation T3 combined with the residual effects of liming and pre-planting fertilization promoted an increase in soil nutrient contents and especially of K, P, Ca and Mg. The productivity, biomass production, accumulation of C and nutrients, indicated that, until the 36 months of age of *Eucalyptus dunnii*, the application of the T3 recommendation promoted higher tree height and, due to this variable, there was an increase in the volume per tree , compared to T1, however, the BHD did not differ between treatments. The amount of biomass and carbon was 58.7 Mg ha^{-1} and 26.9 Mg ha^{-1} respectively. Both did not vary according to the treatments and the tendency of biomass accumulation was: stem wood > branches > stem bark> leaves. Nutrient concentrations ranged between tree components, with higher leaf values and lower values in stem wood, and fertilization recommendations did not influence macronutrient concentrations. In the total biomass, there was an accumulation of 175.8; 25.4; 198.4; 231.6; 75.1 and 17.2 kg ha^{-1} of N, P, K, Ca, Mg and S, respectively. For B, Cu, Fe, Mn and Zn, the amounts were 391.5; 143.0; 2064.2; 12694.8 and 471.5 g ha^{-1}, respectively. The inputs of nutrients via incident rainfall (Pt) were also evaluated and significant amounts of nutrients were incorporated into the aqueous solution, whose contribution sequence was K > S > Ca > N > Mg. These inputs could reduce the addition of 22% and 11% of the K and N doses, respectively, applied in pre-planting fertilization. The nutritional balance, considering the stem wood removal scenario of the *Eucalyptus dunnii*, is positive for nutrients N, P and K and negative for Ca, Mg and S, in all treatments. According to the results found, especially on productivity and biomass, in order to reduce operational costs and environmental impacts, the standard fertilization (150 g plant^{-1} of N-P_2O_5-K_2O 24:00:24), in cover, can be recommended for plantations of *Eucalyptus dunnii* under site conditions similar to the present study.

Keywords: Forest nutrition; nutrient cycling; productivity; forest biomass; nutritional balance.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos físicos do Cambissolo em plantação de *Eucalyptus dunnii* 27

Tabela 2 – Fertilizações de cobertura aplicadas na plantação de *Eucalyptus dunnii* 30

Tabela 3- Caracterização da fertilidade do Cambissolo em plantação de *Eucalyptus dunnii* antes da aplicação de fertilização mineral em cobertura 35

Tabela 4 - Fertilidade do Cambissolo em plantação de *Eucalyptus dunnii* submetida a diferentes recomendações de fertilização mineral em cobertura 37

Tabela 5 - Estoques de nutrientes no Cambissolo em plantação de *Eucalyptus dunnii* antes e depois da fertilização mineral de cobertura 40

Tabela 6 - Número de indivíduos (N), valores médios (± desvio padrão) de diâmetro à altura do peito (DAP) e altura (h), área basal por hectare (G), volume com casca por hectare (V) e por árvore (V') em plantação de *Eucalyptus dunnii* antes e após fertilização mineral em cobertura. 47

Tabela 7 – Estoque de carbono e biomassa nos componentes das árvores de *Eucalyptus dunnii* em diferentes recomendações de fertilização em cobertura 50

Tabela 8 - Concentrações de macronutrientes nos componentes das árvores de *Eucalyptus dunnii* em diferentes recomendações de fertilização em cobertura 54

Tabela 9 - Concentrações de micronutrientes nos componentes das árvores de *Eucalyptus dunnii* em diferentes recomendações de fertilização em cobertura 60

Tabela 10 - Estoque de nutrientes nos componentes da biomassa nas árvores de *Eucalyptus dunnii* em diferentes recomendações de fertilização em cobertura 65

Tabela 11 - Concentrações médias anuais dos nutrientes na precipitação pluviométrica incidente de 2011 a 2013 em plantação de *Eucalyptus dunnii*, São Gabriel/RS 73

Tabela 12 - Quantidades médias anuais de nutrientes na precipitação pluviométrica incidente de 2011 a 2013 em plantação de *Eucalyptus dunnii*, São Gabriel/RS 75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do município de São Gabriel e da área de estudo.....24

Figura 2 - Aspecto da ocupação vegetacional na Área de Preservação Permanente adjacente à plantação de *Eucalyptus dunnii*, São Gabriel, RS. 25

Figura 3 - Diagrama climático do município de São Gabriel, RS (1960-1990). 26

Figura 4 - Perfil de Cambissolo Háplico Distrófico típico na área de estudo. 27

Figura 5 - Aspecto do preparo da área antes do plantio das mudas de *Eucalyptus dunnii*.....28

Figura 6 - Croqui do experimento e randomização dos tratamentos.....29

Figura 7 - Valores médios mensais da precipitação pluviométrica ocorrida de 2011 a 2013 em plantação de *Eucalyptus dunnii* em São Gabriel/RS 71

Figura 8 - Valores médios de pH da precipitação pluviométrica incidente de 2011 a 2013 em plantação de *Eucalyptus dunnii* em São Gabriel/RS 72

Figura 9 - Balanço nutricional em plantação de *Eucalyptus dunnii* submetida a diferentes recomendações de fertilização mineral 77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL 12
2 HIPÓTESE 15
3 OBJETIVOS 15
3.1 Objetivo geral 15
3.2 Objetivos específicos 15
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16
4.1 A espécie *Eucalyptus dunnii* Maiden 16
4.2 Ciclagem dos nutrientes em plantações florestais 17
4.2.1 Entradas de nutrientes em plantações florestais via fertilização mineral 19
4.2.2 Entradas de nutrientes em plantações via precipitação pluviométrica incidente 22
5 METODOLOGIA GERAL 23
5.1 Localização e características gerais da área de estudo 23
5.2 Caracterização climática 25
5.3 Aspectos morfológicos, físicos e biológicos do solo 26
5.4 Caracterização da plantação de *Eucalyptus dunnii* 28
5.5 Delineamento experimental e tratamentos 29
6 ESTUDO 1 – A FERTILIZAÇÃO MINERAL EM *Eucalyptus dunnii* ALTERA O ESTOQUE DOS NUTRIENTES EM CAMBISSOLO 31
6.1 INTRODUÇÃO 31
6.2 MATERIAL E MÉTODOS 33
6.2.1 Coleta e análise química do solo 33
6.2.2 Análise dos dados 34
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 34
6.4 CONCLUSÕES 41
7 ESTUDO 2 – EFEITOS DA FERTILIZAÇÃO MINERAL DE COBERTURA NA PRODUTIVIDADE, ESTOQUES DE NUTRIENTES E CARBONO NA BIOMASSA DE *Eucalyptus dunnii* 42
7.1 INTRODUÇÃO 43
7.2 MATERIAL E MÉTODOS 44
7.2.1 Avaliação do crescimento e produtividade 44
7.2.2 Quantificação da biomassa, estoque de nutrientes e carbono 45
7.3 Análise estatística 46
7.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 46
7.4.1 Crescimento e produtividade 46

7.4.2 Produção de biomassa e alocação de carbono 50
7.4.3 Concentrações de macronutrientes nos componentes das árvores 53
7.4.4 Concentrações de micronutrientes nos componentes das árvores 59
7.4.5 Estoques de nutrientes nos componentes das árvores 64
7.5 CONCLUSÕES 66
8 ESTUDO 3 – CICLAGEM GEOQUÍMICA DOS NUTRIENTES E IMPLICAÇÕES NO BALANÇO NUTRICIONAL 67
8.1 INTRODUÇÃO 67
8.2 MATERIAL E MÉTODOS 69
8.2.1 Amostragem da precipitação 69
8.2.2 Análise estatística 70
8.3 Estimativa do balanço nutricional (BN) 70
8.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 70
8.4.1 Distribuição da precipitação pluviométrica 70
8.4.2 Características químicas da precipitação pluviométrica 72
8.4.3 Aportes de nutrientes via precipitação pluviométrica incidente 74
8.5 Balanço nutricional em plantação de *Eucalyptus dunnii* 76
8.6 CONCLUSÕES 79
9 CONCLUSÕES GERAIS 80
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 81
APÊNDICES 95

1 INTRODUÇÃO GERAL

A avaliação global dos recursos florestais indicou que, no mundo há 290,4 milhões de hectares ocupados com plantações florestais (FAO, 2016), onde 20 milhões destes são plantios de eucalipto (BOOTH, 2013). As plantações manejadas intensivamente representam 1,5% das áreas florestadas do mundo, sendo que, as destinadas à silvicultura com eucaliptos estão entre as mais produtivas, no entanto, só atendem a um terço da demanda por produtos madeireiros (BINKLEY et al., 2017).

No Brasil, o estabelecimento de maciços florestais, principalmente com espécies de rápido crescimento, vem ocorrendo desde o início do século passado (ABRAF, 2012). Até o ano de 2016, a área com árvores plantadas era de 7,84 milhões de hectares, aumento de 0,5% em relação ao ano de 2015, devido exclusivamente a expansão das áreas com eucaliptocultura. Os plantios de eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares, o que representa 71,9% do total da área com árvores plantadas e estão localizados principalmente nos estados de Minas Gerais (24%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (15%) (IBÁ, 2017).

No Rio Grande do Sul, a área com plantações florestais é de 596,7 mil ha, o que equivale a 8% da área plantada no Brasil e 2% do território do estado (28 milhões ha). A maior área é ocupada com eucalipto, que corresponde a 52% (310,2 mil ha), enquanto pinus e acácia representam 31% e 17%, respectivamente. O estado ocupa um lugar de importância no cenário econômico brasileiro, especialmente no que se refere a expressividade de sua cadeia produtiva de base florestal. Em 2014, o setor contribuiu com 4% do PIB do RS, 7% da geração de empregos, 3% da arrecadação de impostos e com 2% do valor de venda de produtos de base florestal exportados (AGEFLOR, 2015).

Em virtude da importância do setor e da expansão da produção florestal no mundo, no Brasil e no Rio Grande do Sul, especialmente com uso de espécies de eucalipto, é necessário aperfeiçoar os processos silviculturais, considerando, sobretudo, a produtividade das plantações comerciais. Isto pode ser possível através da seleção de materiais genéticos adaptados e execução de técnicas apropriadas de manejo, principalmente no que se refere a adição de fertilizantes minerais (GONÇALVES et al., 2015). Junto a este cenário florestal promissor, onde se almeja maior rendimento das plantações, a busca pela conservação dos recursos naturais por meio de investimentos em práticas conservacionistas, tais como o manejo da fertilização, são imprescindíveis, pois com a intensificação do monocultivo os sítios ficam propensos à exaustão nutricional (PAES et al., 2013).

No Rio Grande do Sul, a implantação dos povoamentos florestais dá-se, geralmente, em áreas declivosas e/ou com baixo potencial produtivo para culturas agrícolas e pastagens. Nos últimos anos vem se observando a expansão das fronteiras silviculturais, principalmente no bioma Pampa, ocasionada pela necessidade de suprimento de matéria-prima vegetal ao mercado consumidor, fomento e investimentos empresariais, baixo custo da terra, dentre outras motivações. O sucesso do estabelecimento da silvicultura no Pampa é reflexo da aplicação de tratos adequados, e também da escolha da espécie, levando em consideração aspectos fisiológicos e produtivos em função de cada sítio e condições climáticas (BOOTH et al., 2015).

De acordo com Boldrini et al. (2010), é na região do bioma Pampa onde se encontram as maiores extensões de campo nativo contínuo brasileiro, no entanto, atividades altamente impactantes, como a pecuária intensiva e a agricultura convencional, fragilizaram essas áreas. Atualmente mais de 33% dos locais com formação vegetacional nativa estão degradados e/ou em processo de degradação (VERDUM et al., 2014). A silvicultura, neste contexto, pode ser uma atividade viável ao aproveitamento produtivo destas áreas, além de contribuir para a melhoria da qualidade do solo e contenção do processo erosivo, uma vez que, espécies do gênero *Eucalyptus*, por exemplo, se adaptam aos mais distintos ambientes (BOOTH et al., 2015).

Dentre as espécies potenciais à produção florestal no estado do Rio Grande do Sul, destaca-se o *Eucalyptus dunnii* Maiden, tanto pela sua plasticidade ecofisiológica quanto pela tolerância ao frio, sendo destinado especialmente à indústria de celulose e produção de carvão vegetal (FLORES et al., 2016; GLENCROSS et al., 2014; AGNELI, 2005). Atrelada à expansão da silvicultura de *Eucalyptus dunnii* no bioma Pampa, surgem questionamentos recorrentes, tanto da pesquisa quanto da silvicultura operacional, especialmente em relação à fertilização mineral. Em função das rotações serem relativamente curtas, as fertilizações corretivas de implantação e manutenção vêm se tornando práticas indispensáveis para manter a produtividade florestal (SIMONETE et al., 2013).

Fertilizar as plantações é um aspecto fundamental, pois pode proporcionar maiores retornos financeiros, em detrimento aos ganhos em volume de madeira, condicionados pelo adequado suprimento de nutrientes, geralmente escassos nos solos destinados à silvicultura. No entanto, para o sucesso da fertilização, a definição da recomendação ideal deve ser baseada na diagnose nutricional da árvore e no conhecimento da fertilidade do solo, além de considerar a fase de crescimento da planta, época de aplicação e o parcelamento do adubo, otimizando a absorção e evitando perdas por lixiviação e/ou volatilização, especialmente de nitrogênio e potássio (GONÇALVES et al., 2004; RODELLA e ALCARDE, 2004).

Há muito o que conhecer sobre os efeitos das aplicações corretas e as interações do fertilizante no componente edáfico e, estudos já foram desenvolvidos no intuito de avaliar as recomendações mais eficientes, em função das respostas de diferentes espécies, nas mais variadas condições edafoclimáticas brasileiras (SILVA et al., 2013; JESUS et al., 2012; DIAS et al., 2014; FERNANDEZ et al., 2000; D'AVILA et al., 2011). Variedades de eucalipto, largamente cultivadas nos mais distintos sítios, ainda não foram avaliadas quanto às respostas à nutrição mineral, ao passo que, muitas destas pesquisas foram desenvolvidas apenas em plantações de *Eucalyptus grandis* (SETTE JR et al., 2010; FARIA et al., 2002; GAVA et al., 1997; GRACIANO et al., 2005; RIBEIRO et al., 2010; ROCHA et al., 2004).

Estas pesquisas são necessárias e importantes em um cenário onde se almeja a produção economicamente viável, uma vez que o dispêndio financeiro com estes insumos pode onerar demasiadamente a atividade florestal. Ao mesmo tempo a preocupação ambiental também deve ser preconizada, pois o excesso de dosagens ou aplicação errônea do fertilizante pode causar sérios prejuízos aos cursos hídricos, contaminação do solo, perda de diversidade, dentre outros impactos, que geram duras críticas às atividades silviculturais (BARRETO et al., 2013; KLEIN e AGNE, 2012; COSTA et al., 2016).

Esta pesquisa buscou avaliar os efeitos no estoque de nutrientes no solo, na produtividade, produção de biomassa, alocação de nutrientes e carbono em árvores de *Eucalyptus dunnii*, em função das aplicações de distintas recomendações de fertilizante mineral em cobertura. Junto da análise das entradas de nutrientes via precipitação pluviométrica incidente, contribuinte essencial na ciclagem geoquímica, realizaram-se as estimativas quanto ao balanço nutricional sob influência da fertilização. Estas informações são essenciais à silvicultura, indicando a tendência de manutenção da sustentabilidade do sítio.

2 HIPÓTESE

A intensificação da ciclagem geoquímica, por meio fertilização mineral em cobertura, implicará em maior estoque de nutrientes no solo, condicionando maior produção de biomassa e acúmulo de nutrientes em plantação de *Eucalyptus dunnii* na região da campanha central do bioma Pampa, Rio Grande do Sul.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar os efeitos da ciclagem geoquímica dos nutrientes, em função da aplicação de diferentes recomendações de fertilizantes em uma plantação de *Eucalyptus dunnii*.

3.2 Objetivos específicos

a) Avaliar o efeito da fertilização mineral no estoque de nutrientes do solo;
b) Avaliar a produtividade, biomassa, alocação de nutrientes e carbono, nos componentes das árvores, em função de diferentes recomendações de fertilizante;
c) Estimar o balanço nutricional considerando as entradas de nutrientes pela água da precipitação pluviométrica incidente, diferentes recomendações de fertilização mineral e saídas pela colheita de biomassa da madeira do tronco em plantação de *Eucalyptus dunnii*.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A espécie *Eucalyptus dunnii* Maiden

Pertencente à família Myrtaceae, as mais de 600 espécies do gênero *Eucalyptus*, descrito em 1789 por L'Héritier, são endêmicas da Austrália (exceto *E. deglupta* que é da Nova Guiné e *E. urophylla*, da Indonésia), onde dominam a maioria das paisagens, ocupando distintos nichos após milhões de anos de evolução e especialização (FLORES et al., 2016; BROOKER e KLEINIG, 1994). O *Eucalyptus* foi introduzido no Brasil, nos estados do Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro e São Paulo, no final do século XIX, com finalidade ornamental. Mas, foi através da inciativa de Edmundo Navarro de Andrade que, em 1904, iniciou pesquisas para avaliar a aptidão e possibilidades de expansão do cultivo das espécies de eucalipto. Os estudos visavam atender ao suprimento de matéria-prima madeireira, demandada pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro e, a partir de então, em meados da década de 1940 as plantações florestais começaram a ser cultivadas em propriedades rurais (FLORES et al., 2016; FERREIRA, 2015).

Dentre as espécies de interesse para o setor florestal destaca-se o *Eucalyptus dunnii* Maiden, que somente a partir do ano de 1953 foi adicionado à coleção do Horto de Rio Claro, em São Paulo, organizado por Navarro (VENTURIN et al., 2014). Naturalmente, *Eucalyptus dunnii* possui distribuição restrita na região nordeste de Nova Gales do Sul e sudeste de Queensland, e na Austrália é uma das espécies com maior crescimento (IPEF, 2015). As principais exigências para o cultivo da espécie são temperatura média anual entre 16 e 19 ºC, além de precipitação anual entre 900 e 1.600 mm, o que compreende a classificação climática do tipo Cfa. *Eucalyptus dunnii* possui aptidão classificada como alta em quase todo o estado do Rio Grande do Sul e média na região dos Campos de Cima da Serra e parte do Alto Uruguai (FLORES et al., 2016).

O plantio da espécie é uma alternativa potencial para o empreendedor florestal na região sul do Brasil (MALYSZ et al., 2011), no entanto, produz poucas sementes (IPEF, 2015; MALYSZ et al., 2011) e protocolos de multiplicação com técnicas de clonagem ainda estão sendo testados (BRONDANI et al., 2010). O cultivo do *Eucalyptus dunnii* se justifica em função da boa adaptação e tolerância aos locais com incidência de geadas (HIGA et el., 2000) e déficit hídrico (IPEF, 2015), capacidade de utilização eficiente dos recursos do solo (GLENCROSS et al., 2014), além de taxas de sobrevivência consideravelmente significativas após estabelecidas em campo (FILHO e SANTOS, 2005).

Segundo Gutiérrez (1976), a espécie apresenta forma e hábito semelhantes ao *Eucalyptus saligna*, com madeira de cor clara e de boa qualidade, utilizada para construções e

fabricações de móveis. No entanto, para o uso como matéria-prima em serraria, a espécie não possui os parâmetros exigidos para classificação de madeira de boa qualidade (ROCHA, 2000). A principal utilização do *Eucalyptus dunnii* é para produção de polpa e celulose, que é de boa qualidade e apresenta bom rendimento no processo industrial (GLENCROSS et al., 2014; AGNELI, 2005). A espécie também tem grande potencial para outros usos, como postes para eletrificação, madeira roliça para a construção civil e produção de carvão vegetal (FINGER et al., 1995).

4.2 Ciclagem dos nutrientes em plantações florestais

A ciclagem de nutrientes é um processo importante para a manutenção da produtividade em plantações comerciais de eucalipto, podendo prover o suprimento nutricional ao desenvolvimento da vegetação (POGGIANI e SCHUMACHER, 2005; PRICHTETT e FISHER, 1987). Este processo ecológico é importante para a continua circulação de nutrientes no sítio florestal, ao passo que, o entendimento destes fluxos possibilita a definição de manejos silviculturais eficientes, que são elaborados com base na análise dos balanços nutricionais (SCHUMACHER e VIERA, 2015). Estas informações são imprescindíveis, pois a variabilidade na dinâmica nutricional em plantas de eucalipto, que implica em maior ou menor acúmulo de minerais nos componentes das árvores, pode afetar o estoque de nutrientes no solo, através do impacto causado pela elevada exportação após a colheita da biomassa (LEITE et al., 2011).

Para compatibilizar a disponibilidade de nutrientes no sistema e a demanda pelo eucalipto ao longo de seu ciclo de cultivo, é necessário que os fluxos de nutrientes sejam bem entendidos (LEITE et al., 2011). A compreensão do ciclo dos nutrientes (velocidade de fluxo, entradas e perdas, interação solo-planta, distribuição nos componentes das árvores acima e abaixo do solo) é fundamental para a definição de tecnologias de manejo florestal, particularmente quanto a recomendação, método e época de aplicação de fertilizantes (GONÇALVES et al., 2004).

Alternativas advindas dos resultados de pesquisas sobre o ciclo de nutrientes em povoamentos florestais são de fundamental importância, pois possibilitam a previsão de situações que poderiam ser críticas a médio e longo prazo, como por exemplo, a deficiência de minerais (VIERA et al., 2015). Para tanto, pode-se entender parte da ciclagem de nutrientes através da análise dos teores destes elementos nos tecidos vegetais, pois estes refletem o status nutricional de uma árvore, ao passo que, a demanda pela planta depende da taxa de crescimento e da eficiência de conversão em biomassa (BARROS et al., 2004).

A quantidade de nutrientes acumulada em plantações florestais varia em função da biomassa produzida nos diferentes componentes das árvores (folhas, galhos, cascas, madeira, raízes, frutos, sementes, flores) e, geralmente, ao final da rotação, observa-se um gradiente de concentração de nutrientes com a tendência folhas > casca da madeira > galhos > madeira do tronco (SCHUMACHER, 1992). A maior demanda e concentração de nutrientes nas folhas dá-se em virtude da maioria dos processos fisiológicos ocorrerem nesta parte da planta (MARSCHNER, 1995). As concentrações de nutrientes nas árvores podem variar em função do material genético, fertilidade do solo, clima, práticas silviculturais e doenças/pragas (SILVEIRA et al., 2004). Os nutrientes atuam em vários processos metabólicos e, juntamente com água, radiação solar, temperatura e oxigênio, compõem os fatores determinantes do crescimento vegetal e da produtividade florestal (BARROS et al., 2014; SANTANA et al., 2014).

De acordo com Switzer e Nelson (1972), o processo de ciclagem de nutrientes nos ecossistemas florestais pode ser caracterizado em três tipos: I: Ciclo bioquímico, que relaciona-se com as transferências internas dos elementos nos vegetais, compreendendo todos os movimentos de translocação de nutrientes dentro da planta, responsáveis pelos processos metabólicos; II: Ciclo geoquímico, refere-se à troca (entrada e saída) de elementos minerais entre os diversos ecossistemas, onde as maiores perdas de nutrientes são ocasionadas pelos processos de erosão e lixiviação pela água de drenagem, fogo, processos de denitrificação e, principalmente, pela colheita florestal (POGGIANI e SCHUMACHER, 1997); III: Ciclo biogeoquímico, que é aquele que se estabelece nas relações entre o solo e a planta, ou seja, todas as entradas de nutrientes (ciclo geoquímico), que são acumulados e disponibilizados na solução do solo e posteriormente absorvidos pelas plantas e, dentro desta circulam, translocam e retranslocam nos tecidos (ciclo bioquímico).

A ciclagem bioquímica, caracterizada pelas movimentações e alocações de nutrientes nos tecidos das plantas, pode ser intensificada em função do manejo da fertilização em plantios jovens, no entanto, a necessidade de fornecer minerais ao solo reduz com o avanço da rotação. Isto é possível pois, a ciclagem bioquímica dos nutrientes torna-se mais expressiva a partir da fase em que as copas já estão totalmente desenvolvidas, onde as árvores atuam como fonte de elementos ao solo, por meio da produção e decomposição de serapilheira, que contribui para o suprimento da demanda nutricional (GONÇALVES et al., 2004). Neste contexto, Miller (1995) afirma que depois de estabelecida a ciclagem bioquímica, até 66% da demanda de nutrientes, pode ser suprida pela redistribuição.

Segundo Cunha et al. (2005), o acúmulo e distribuição de nutrientes nos componentes da planta e no solo podem servir de indicadores de qualidade dos ecossistemas, em virtude da manutenção da capacidade produtiva e suprimento nutricional para as plantas a longo prazo. De acordo com Santana et al. (2008), o conhecimento da alocação de nutrientes nos componentes das árvores permite a adoção de técnicas conservacionistas de colheita, que reduzam a exportação de nutrientes do sítio.

Considerando aspectos da ciclagem geoquímica, formas expressivas de incorporação de nutrientes em ecossistemas consistem na entrada via deposição atmosférica úmida e seca, caracterizada pelo carreamento de minerais via solução aquosa da precipitação pluviométrica incidente e lavagem de copas das árvores (CHANG, 2006; CASTRO, 1980), deposição e decomposição de serapilheira (POGGIANI, 2012) e fertilização mineral, através da aplicação de adubo (orgânico ou químico) no solo ou em área foliar. Quantificar, qualificar e manejar estas entradas são aspectos primordiais à silvicultura, visando a otimização da nutrição florestal, redução de custos e operações, aliando produção e conservação de recursos naturais (SANTANA et al., 2014; BARROS et al., 2014).

4.2.1 Entradas de nutrientes em plantações florestais via fertilização mineral

A fertilização está tornando possível o monocultivo nas mais diversas áreas e para a garantia de altas produtividades, em curto espaço de tempo, a aplicação de fertilizantes minerais já é uma técnica generalizada na eucaliptocultura do Brasil (BARROS et al., 2014). A adição de elementos minerais aos povoamentos florestais, através da fertilização, se faz necessária em função da remoção de grandes quantidades de nutrientes do sítio, através da colheita da madeira (SANTANA et al., 2008), erosão do solo e lixiviação (LEITE, 2014).

A adequada recomendação da adubação deve ser baseada em decisões que considerem o período de crescimento, que vai do plantio até a fase do tocar de copas (entre 18 e 36 meses de idade do povoamento de eucalipto, em média, dependendo do espaçamento) (SANTANA et al., 2014). Esta etapa requer grande atenção para a fertilização florestal e possui potencial de resposta muito elevado, pois a planta atua como forte dreno dos nutrientes disponíveis do solo (BARROS et al., 2014).

A fertilização mineral em plantações de eucalipto geralmente envolve a adição de nutrientes pouco disponíveis no solo, de rápida lixiviação e de demanda em altas quantidades pela planta, os chamados macronutrientes, especialmente nitrogênio, potássio e fósforo. A combinação destes elementos, comercializada nas mais diversas formulações e proporções,

forma o composto conhecido como NPK (N-P_2O_5-K_2O ou KCl) (MARSCHNER, 1995; MARENCO e LOPES, 2009; TAIZ e ZEIGER, 2013).

Pesquisas já demonstraram que o uso de fertilizantes pode promover maior crescimento e produtividade de árvores. Por exemplo, Silva et al. (2013) verificaram que a fertilização com 160, 64 e 210 kg ha^{-1} de N, P e K, respectivamente, promoveu maior volume em árvores de *Eucalyptus urograndis* cultivadas em solo arenoso (42 m^3 ha^{-1}) quando comparada à testemunha (26 m^3 ha^{-1}). Os autores também observaram que os efeitos das maiores doses sobre o crescimento diminuíram no segundo ano após o plantio, portanto recomendam que as empresas florestais reduzam o número de aplicações de fertilizantes, em cobertura, após os 24 meses do plantio.

Respostas a fertilização potássica foram avaliadas em plantação de *Eucalyptus grandis*, após 80 meses de condução da segunda rotação sob Latossolo Vermelho-Amarelo álico, onde o volume de madeira após a aplicação de 120 kg ha^{-1} de KCl foi de 135,5 m^3 ha^{-1}, valor 54% superior ao produzido no cultivo sem adubação (FARIA et al., 2002). A adição de 116 kg ha^{-1} de KCl também promoveu maior incremento acumulado do diâmetro do tronco, após 24 meses do plantio de *Eucalyptus grandis*, que passou de 3,1 cm (testemunha) para 4,1 cm (SETTE Jr. et al., 2010). A incorporação de potássio na fertilização de eucalipto é muito importante, pois o K é o segundo elemento que mais limita a obtenção de altas produtividades da espécie no Brasil (BARROS et al., 2014). Pesquisas recentes relataram que a fertilização potássica também pode otimizar a eficiência do uso da água em plantações de eucalipto (BATTIE-LACLAU et al., 2016).

O nitrogênio é o elemento que mais limita a produtividade, portanto, requerido em maiores quantidades pelo eucalipto nas fases mais jovens, mas as repostas à aplicação desse nutriente ainda são divergentes (FERREIRA et al., 2015). Há grande quantidade de nitrogênio acumulado em plantações de alta produtividade e com a aplicação de 154 kg ha^{-1} de sulfato de amônio em *Eucalyptus urophylla*, cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo de textura muito argilosa, aos 30 meses após o plantio, o volume de madeira do tronco passou de 60 m^3 ha^{-1} (testemunha) para 95,2 m^3 ha^{-1} (JESUS et al., 2012).

A adição de fósforo também é importante para o crescimento inicial do eucalipto, pois há grande exigência pelo nutriente na fase de implantação, ao passo que esta demanda diminui com o avanço da idade (DIAS et al., 2014; 2015). É necessário atentar-se à fertilização fosfatada, pois a interação do fósforo com o alumínio, ferro e cálcio, aliada à sua ocorrência em formas orgânicas e sua lenta taxa de difusão na solução do solo, tornam o P o nutriente menos prontamente disponível na rizosfera (ARAÚJO e MACHADO, 2006). Mesmo quando são

aplicados fertilizantes, a maior parte do P adicionado é adsorvida em coloides do solo, tornando-se, com o tempo, não disponível, dada a formação de compostos de baixa solubilidade, e a planta não absorve diretamente o fósforo do fertilizante aplicado, mas sim na forma H_2PO_{4-} na solução do solo, após transformações (MALAVOLTA, 2006).

Entre as alternativas de fontes de fertilizante fosfatado, Dias et al. (2014) relatam que o fosfato solúvel (FS) é mais utilizado para a fertilização de plantio e cobertura em eucalipto, pela dissolução rápida no solo, no entanto, tem custo mais elevado que os fosfatos naturais (FN) de dissolução mais lenta. Em Cambissolo distrófico e ácido, os autores realizaram estudos com espécies importantes para a silvicultura no sul do Brasil, o *Eucalyptus benthamii*, que foi mais exigente à adubação fosfatada, mas permitiu a substituição parcial de FS por FN e, *Eucalyptus dunnii* que não respondeu à aplicação de FN.

O uso de fertilizantes fosfatados também foi avaliado em plantio de *Eucalyptus camaldulensis*, onde Fernandez et al. (2000) avaliaram o efeito da aplicação de fosfato natural (FN) e superfosfato simples (SFS), sobre o volume e produção de biomassa em plantação conduzida em Latossolo Vermelho-Amarelo. Foi observado que a aplicação de fertilizantes fosfatados aumentou o volume do tronco da árvore e a produção de biomassa, sendo que, o FN e SFS produziram melhores resultados quando foram aplicados em sulco. A combinação de SFS (na cova de plantio) com FN (no sulco), produziu o maior volume de tronco e biomassa da parte aérea, enfatizando a influência da adubação no rendimento final do povoamento, através do suprimento à alta demanda inicial de P pré-plantio.

Alternativas à fertilização mineral convencional estão sendo testadas, tais como o uso de biossólidos, que promoveram melhorias na fertilidade do solo e influenciaram positivamente a nutrição de *Eucalyptus grandis* (ROCHA et al., 2004; GUEDES et al., 2006). Outro subproduto que pode ser utilizado é o resíduo industrial de lama de cal, originado da produção de papel *kraft* branqueado de eucalipto, que possui eficiência semelhante ao calcário dolomítico. O uso deste rejeito aumentou a produção de biomassa aérea em *Eucalyptus saligna* e elevação do pH, cálcio e sódio, ao passo que, houve redução de alumínio no solo (SIMONETE et al., 2013).

É muito importante buscar alternativas no âmbito da fertilização mineral, validando novos produtos e subprodutos, que possam substituir as extrações de fontes naturais, propensas ao exaurimento com o passar do tempo. Este viés também deve estar atrelado ao manejo adequado da adubação, a fim de que este seja realizado de forma eficiente e sem dispêndios. Através da fertilização deve-se objetivar sempre a manutenção da qualidade do sítio e a redução de impactos ambientais, tais como a contaminação e eutrofização de cursos d’água em

detrimento ao excesso da aplicação de nitrogênio (nitrato), fósforo, dentre outros elementos (BARRETO et al., 2013; KLEIN e AGNE, 2012; COSTA et al., 2016).

4.2.2 Entradas de nutrientes em plantações via precipitação pluviométrica incidente

O suprimento de nutrientes às plantações florestais advém, não somente da adição de fertilizantes ou liberação de compostos da matéria orgânica, mas também pela precipitação pluviométrica que incorpora, por meio da deposição úmida (chuva), os nutrientes em suspensão na atmosfera, além de poeiras, *spray* marinho, fuligens e outros particulados (deposição seca) depositados sobre o dossel. Depois de dissolvidos na água, estes elementos, que passarão pela copa e tronco das árvores, serão incorporados ao solo, contribuindo para a ciclagem geoquímica de nutrientes, processo indispensável à sustentabilidade nutricional de plantações (BEGON et al., 2007).

A dinâmica hidrológica acaba condicionando a aptidão de espécies florestais e esta é muito variável, com distintos comportamentos em função do local de incidência, estação do ano (LACLAU et al., 2003). A concentração dos nutrientes está diretamente relacionada à quantidade de água oriunda da precipitação uma vez que, quanto menor o volume de precipitação, menor será a diluição dos nutrientes em água e, consequentemente, maiores serão as suas concentrações (CHANG, 2006).

No início da chuva, as concentrações de nutrientes são mais elevadas, mas elas caem à medida que a atmosfera se torna progressivamente limpa. Os nutrientes dissolvidos na precipitação se tornam disponíveis às plantas em geral quando a água alcança o solo e pode ser absorvida pelas suas raízes, todavia, parte dos nutrientes é absorvida diretamente pelas folhas (BEGON et al., 2007). Em uma plantação de eucalipto, os vários caminhos que a água poderá seguir, após uma dada precipitação, podem ser subdivididos em interceptação, evaporação das superfícies úmidas, transpiração das plantas, evaporação do solo, armazenamento nos poros do solo e o derrame da bacia hidrográfica, através de algum canal ou rio que a mesma possuir (SCHUMACHER e VIERA, 2015).

A água da chuva não é pura, pois contêm substâncias químicas derivadas de fontes de gases-traço, como óxidos de enxofre e nitrogênio, aerossóis produzidos quando gotículas de água provenientes dos oceanos evaporam na atmosfera e liberam partículas ricas em sódio, magnésio, cloreto e sulfato, e ainda, partículas de poeiras de incêndios, vulcões e vendavais, ricas em cálcio, potássio e sulfato (BEGON et al., 2007). O acúmulo destes elementos, poeira e cinzas sobre o dossel, que são carreadas após a interceptação pelo folhedo, influencia a

concentração de íons na solução aquosa, conforme foi observado nos trabalhos de Shen et al. (2013), Heartsill-Scalley et al. (2007), Eisalou et al. (2013), Balestrini et al. (2007) e Dezzeo e Chacón (2006). Em plantações florestais, a concentração dos nutrientes na precipitação incidente também é aumentada após o contato da água com as copas das árvores, sendo que, este padrão foi verificado em plantios de *Eucalyptus dunnii* (CORRÊA, 2011), *Eucalyptus grandis* (LACLAU et al., 2010a), *Eucalyptus* sp. (LACLAU et al., 2003) e *Eucalyptus globulus* (ASHAGRIE e ZECH, 2010).

Para Schumacher et al. (2011), o monitoramento do aporte dos íons provenientes da deposição atmosférica é importante no sentido de se conhecer os processos de ciclagem de nutrientes. Estas informações são úteis para o fornecimento de subsídios ao manejo silvicultural sustentável, que se faz, por exemplo, através do uso racional de fertilizantes nas etapas de plantio e manutenção de plantações florestais. Correia e Andrade (2008) ressaltam que a produtividade vegetal é determinada pela distribuição das chuvas, a qual é influenciada pela disponibilidade de água no solo, e, numa escala mais restrita, pela disponibilidade de nutrientes. Das variáveis climáticas, a precipitação e temperatura são as que mais influenciam na quantidade de serapilheira produzida, e a água exerce efeito na decomposição da matéria orgânica e no transporte de nutrientes para as raízes.

Estudos sobre a qualidade química da precipitação pluviométrica também estão revelando a expressiva presença de elementos indicadores de emissões de gases poluentes, que estão acidificando a água, consequentemente afetando as plantações florestais (DUAN et al., 2016). Por exemplo, a presença de elevadas concentrações de sulfato (SO_4^{2-}) na composição química da precipitação incidente é apontada como uma das consequências das emissões antropogênicas, que vêm contribuindo para o aumento da poluição atmosférica (ARMBRUSTER et al., 2003).

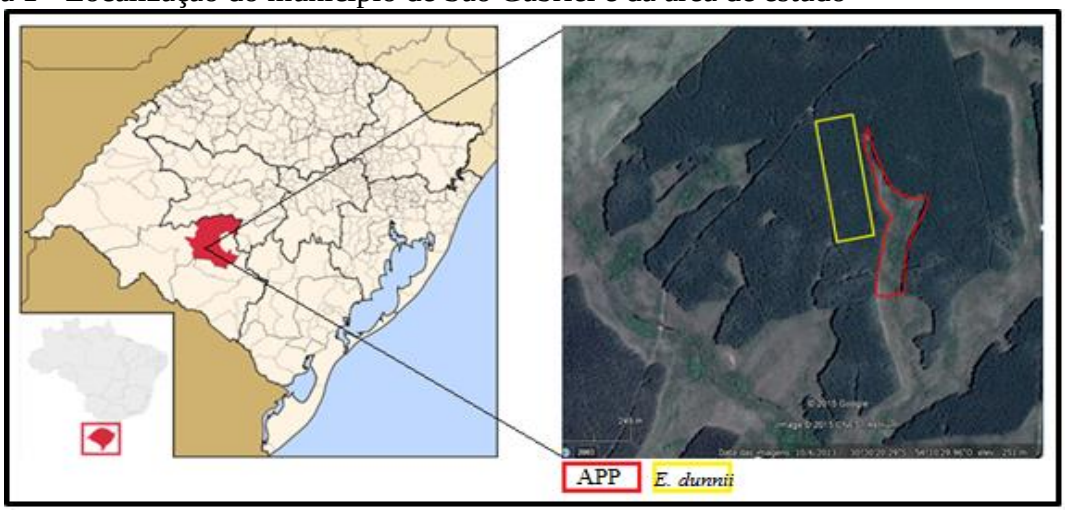
5 METODOLOGIA GERAL

5.1 Localização e características gerais da área de estudo

O presente estudo foi realizado em uma área com plantação de *Eucalyptus dunnii*, na Fazenda Ponta das Canas, pertencente à empresa Celulose Riograndense (CMPC), localizada no município de São Gabriel, região da campanha central do bioma Pampa, Rio Grande do Sul, Brasil. A área de estudo (coordenadas geográficas centrais de 30º 30’ 12” S e 54º 10’ 0,8” O),

encontra-se em altitude de 114 metros em relação ao nível médio do mar, em relevo que varia de suave a ondulado (Figura 1).

Figura 1 - Localização do município de São Gabriel e da área de estudo



Fonte: (Wikipédia; Google Earth, 2015; Elaborado pelo autor, 2018)

A região possui fitofisionomia caracterizada predominantemente pelos campos nativos, que constituem a principal formação vegetacional do bioma (BOLDRINI et al., 2010). Entremeando as gramíneas estão os capões florestais, que ocorrem ao longo dos cursos dos rios, e as espécies florestais, típicas da Floresta Estacional Subtropical, ocupam naturalmente zonas ripárias e matas ciliares do Pampa (PILLAR et al., 2009). Atualmente mais de 33% dos locais com formação vegetacional nativa do bioma estão degradados e/ou em processo de degradação, em função de atividades altamente impactantes, como a pecuária intensiva e a agricultura convencional (VERDUM et al., 2014)

Este reflexo pode ser observado em Área de Preservação Permanente adjacente à plantação de *Eucalyptus dunnii* estudada, (Figura 2), mantida em função de aspectos legais e isolada há mais de dez anos, onde há baixa diversidade de espécies. O predomínio e elevada incidência de *Eragrostis plana* (capim-annoni), gramíneas, *Baccharis* spp. e *Vassobia breviflora* (esporão-de-galo) em locais a pleno sol e, em ambiente mais úmido, próximo ao curso d'água, a baixa ocorrência das espécies colonizadoras *Myrsine umbellata* (capororoca), *Schinus terebinthifolius* (aroeira-vermelha) e *Zanthoxylum rhoifolium* (mamica-de-cadela), caracterizam a situação de área degradada que está em processo de sucessão secundária (DICK et al., 2016c)

Figura 2 - Aspecto da ocupação vegetacional na Área de Preservação Permanente adjacente à plantação de *Eucalyptus dunnii*, São Gabriel, RS.

Fonte: (Dick et al., 2016c)

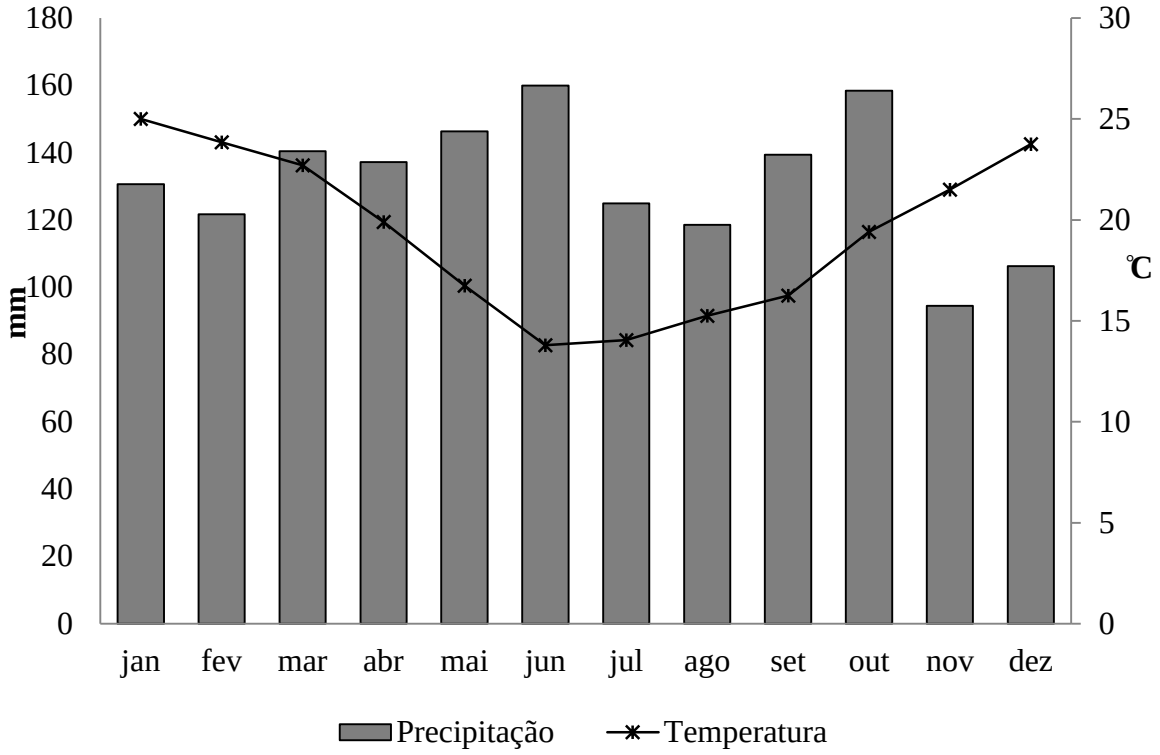
Com base neste levantamento, pode-se entender o histórico da área de estudo antes da conversão do uso do solo para a silvicultura, pois esta condição vegetacional atual é indicativa da atividade pecuária pretérita, uma vez que, após o isolamento, a presença expressiva de espécies rústicas e pioneiras indicou a colonização inicial do local, que provavelmente estava em estágio de degradação do campo nativo e do solo (REIS et al., 2003).

5.2 Caracterização climática

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa subtropical úmido, com verão quente e sem estação seca. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22 ºC e, no mês mais frio as médias variam entre -3 ºC a 18 ºC. Quanto a precipitação pluviométrica, a mínima no mês mais seco é superior a 40 mm e a precipitação média anual pode variar de 1.600 a 1.900 mm ano^{-1} (ALVARES et al., 2014).

Na Figura 3 consta o diagrama climático do município de São Gabriel, elaborado a partir de dados médios de temperatura e precipitação (1960-1990) (INMET, 2016). Pode-se observar que, na região, as temperaturas mais baixas ocorrem nos meses de junho, julho e agosto (estação do inverno) e as mais altas no período do verão, de novembro a fevereiro. Já a precipitação é bem distribuída ao longo do ano, no entanto, com menor ocorrência na estação mais quente.

Figura 3 - Diagrama climático do município de São Gabriel, RS (1960-1990).



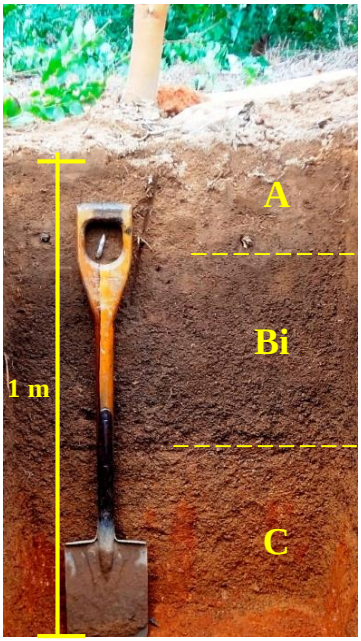
Fonte: (Inmet, 2016; Elaborado pelo autor, 2018)

Durante o período de estudo, a precipitação pluviométrica anual foi de 1.781 mm, 1.980 mm e 1.355 mm em 2014, 2015 e 2016, respectivamente. Volumes de precipitação acima da média ocorreram na região da campanha central do Rio Grande do Sul no ano de 2015, pois o regime de chuvas foi influenciado pelo fenômeno climático “El Niño”, que estava atuando em todo o estado (INPE, 2016).

5.3 Aspectos morfológicos, físicos e biológicos do solo

No munícipio de São Gabriel, o material de origem dos solos é o arenito, oriundo da formação geológica Botucatu. O solo da área de estudo é classificado como Cambissolo Háplico Distrófico típico (EMBRAPA, 2013), de média profundidade, apresentando no perfil uma sequência de horizontes A-Bi-C (Figura 4), onde o horizonte Bi é do tipo B incipiente, ou seja, está em formação, mas com desenvolvimento de cor e estrutura suficiente para ser distinguido dos demais horizontes, podendo apresentar fragmentos de rochas (STRECK et al., 2008).

Figura 4 - Perfil de Cambissolo Háplico Distrófico típico na área de estudo.



Fonte: (Autor, 2018)

Devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, as características do Cambissolo variam muito de um local para outro (EMBRAPA, 2013). São solos com aptidão ao cultivo de árvores, pois possuem profundidade superior a 50 cm, no entanto, cabe ressaltar que a prática da silvicultura, nestas áreas, demanda de ações conservacionistas intensas, além de aplicação de fertilizantes e corretivos (STRECK et al., 2008).

Quanto aos aspectos físicos do solo na área de estudo (Tabela 1), a textura é média e a densidade é considerada adequada para solo arenoso, que pode variar entre 1,20 a 1,90 g cm^{-3} (EMBRAPA, 1997). As partículas de areia grossa, areia fina, cascalho, calhaus, condicionaram os valores de densidade e representam a composição granulométrica deste solo.

Tabela 1 - Atributos físicos do Cambissolo em plantação de *Eucalyptus dunnii*

Prof. (cm)	**Ds[1]** g cm^{-3}	**AG**	**AF**	**Silte**	**Argila**	**Tfsa**	**Cascalho**	**Calhaus**
		g kg^{-1}				**%**		
0 a 20	1,45	720	90	70	120	83,7	15,4	0,9
20 a 40	1,49	700	90	80	120	65,9	30,4	3,7
40 a 60	1,53	700	80	50	160	34,7	50,3	15,0
60 a 80	1,58	670	100	70	160	36,1	44,2	19,7

Prof. = profundidade do solo; Densidade do Solo (Ds), obtida pelo método do anel volumétrico (Embrapa, 1997); Areia Grossa (2 - 0,2 mm) (AG); Areia Fina (0,2 -0,05 mm) (AF); Silte (0,05 - 0,002 mm); Argila (< 0,002 mm); Terra fina seca ao ar (< 2 mm) (Tfsa); Cascalho (20 a 2 mm); Calhaus (> 20 mm) (Tedesco et al., 1995).
Fonte: (Autor, 2018)

A qualidade biológica do solo sob a plantação de *Eucalyptus dunnii* é caracterizada pela baixa diversidade de artrópodes epigéicos (índice de Shannon-Wiener ≈ 1,40), com expressividade dos grupos Collembola (colêmbolos), Acari (ácaros), Orthoptera (grilos e gafanhotos) e Hymenoptera (formigas), que foram considerados os organismos bioindicadores desta área onde houve preparo do solo e tratos culturais para implantação florestal (DICK et al. (2016d).

5.4 Caracterização da plantação de *Eucalyptus dunnii*

O estudo foi desenvolvido em um talhão de 26,2 ha de área total ocupado com plantação de *Eucalyptus dunnii*, cujo plantio das mudas seminais foi realizado no dia 12 de maio de 2014, em curva de nível, com espaçamento de 3,0 m x 1,7 m (densidade inicial de 1.961 plantas por hectare). Este povoamento compreende a segunda rotação na área, antecedida por plantação de *Eucalyptus saligna*, implantada no ano de 2007, cujo corte raso foi realizado aos sete anos de idade. Desta colheita foram mantidos os tocos e resíduos e, para o novo plantio, o preparo do solo foi realizado na entrelinha, com subsolagem utilizando trator e implemento de três hastes, até a profundidade de 50 cm (Figura 5).

Figura 5 - Aspecto do preparo da área antes do plantio das mudas de *Eucalyptus dunnii*

*Detalhe para a manutenção do toco remanescente e resíduos do ciclo anterior sobre o solo.

Fonte: (Autor, 2018)

Após o preparo do solo, realizou-se a adubação de pré-plantio em área total, com aplicação de 2 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico e N-P_2O_5-K_2O, com a formulação de 10:27:10, na quantidade de 400 kg ha^{-1} no sulco, o que corresponde à fertilização de 40 kg ha^{-1} de N (20

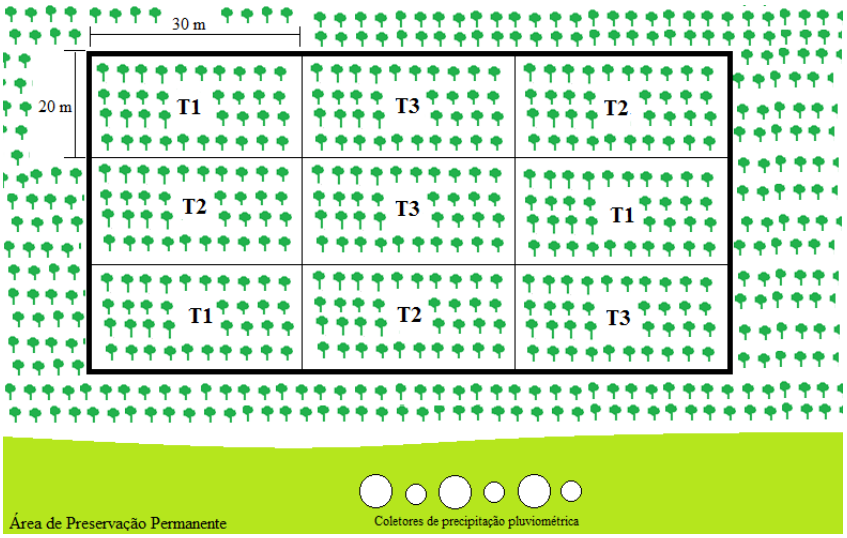
g planta^{-1}); 47 kg ha^{-1} de P (24 g planta^{-1}) e 33 kg ha^{-1} de K (17 g planta^{-1}). Para o controle da mato-competição, antes do plantio das mudas, foi utilizado 3 kg ha^{-1} de herbicida SCOUT® (glifosato) em área total e 1,2 L ha^{-1} de GOAL® (oxyfluorfen) em pré-emergência na linha de plantio. Após um ano do plantio, repetiu-se a aplicação de glifosato, na entrelinha das árvores.

Aos oito meses de idade da plantação de *Eucalyptus dunnii*, a biomassa de raízes finas (diâmetro menor que 2 mm) foi de 324,3 kg ha^{-1} em até 20 cm de profundidade do solo e, em até 10 cm do solo houve concentração de 59,5% de todas as raízes finas (DICK et al., 2016a). O status nutricional das folhas, aos oito e aos quatorze meses após o plantio (DICK et al., 2016f), não diferiu entre plantas e os teores de N, P, K e Mn estiveram dentro da faixa adequada, em contrapartida, deficiências nutricionais foram constatadas para Ca, Mg, S, B, Cu, Fe e Zn, segundo a interpretação sugerida por Gonçalves (1995).

5.5 Delineamento experimental e tratamentos

A área do experimento foi conduzida em 0,54 ha do talhão, delimitada em nove unidades amostrais, constituídas por parcelas de 20 m x 30 m cada. Em função do plantio em curva de nível, as parcelas foram instaladas em orientação perpendicular à pendente, seguindo o delineamento inteiramente casualizado (Figura 6). Inicialmente havia uma média de 80 plantas por unidade amostral, mas para as avaliações dos efeitos dos tratamentos, foi considerada bordadura dupla para isolar possíveis interações (sistema radicular e distribuição do fertilizante) e interferências nos dados (influência dos tratamentos aplicados nas parcelas vizinhas).

Figura 6 - Croqui do experimento e randomização dos tratamentos



Fonte: (Autor, 2018)

Os tratamentos (Tabela 3) consistiram na aplicação de diferentes recomendações do fertilizante N-P_2O_5-K_2O, nas proporções de 24:00:24, em cobertura. Foi utilizada esta formulação pois consiste na adubação padrão adotada pela empresa, obtida através da recomendação baseada na plataforma NUTRICALC, que estimou a demanda de nutrientes a ser aplicada via fertilização, por meio de análise dos fluxos e estoques, em função da produtividade esperada e eficiência nutricional da espécie (BARROS et al., 1995). Ressalta-se que não houve aplicação de fósforo em cobertura, uma vez que, este nutriente já foi adicionado na adubação de plantio.

Tabela 2 – Fertilizações de cobertura aplicadas na plantação de *Eucalyptus dunnii*

Tratamento	**Recomendação**	**Adubação por planta**
T1	FP* (150 g planta^{-1})	36 g de N; 30 g de K
T2	FP (150 g planta^{-1}) + 50% FP (75 g planta^{-1})	54 g de N; 45 g de K
T3	FP (150 g planta^{-1}) + 200% FP (300 g planta^{-1})	108 g de N; 90 g de K

*FP = recomendação padrão da fertilização em cobertura adotada pela empresa
Fonte: (Autor, 2018)

A quantidade total de fertilizante 24:00:24 aplicado em T1 foi de 294 kg ha^{-1} (70 kg ha^{-1} de N e 58 kg ha^{-1} de K), em T2 houve aplicação de de 441 kg ha^{-1} (106 kg ha^{-1} de N e 88 kg ha^{-1} de K) e em T3 a quantia foi de 882 kg ha^{-1} (212 kg ha^{-1} de N e 176 kg ha^{-1} de K). Todos os tratamentos foram aplicados no mesmo dia, à lanço sobre o solo, na área de projeção da copa das árvores de *Eucalyptus dunnii*, em 09 de julho de 2015, aos 14 meses de idade da plantação.

O presente trabalho é constituído por estudos que relatam as implicações da fertilização mineral, em cobertura, sobre o estoque de nutrientes no solo (Estudo 1), seguida de abordagens quanto aos efeitos na produtividade das árvores de *Eucalyptus dunnii*, produção de biomassa e carbono e acúmulo de nutrientes (Estudo 2), além da contribuição da precipitação pluviométrica à ciclagem geoquímica. De posse das informações sobre as entradas (precipitação e fertilização) e saídas (acúmulo de nutrientes na biomassa), realizou-se o balanço nutricional no sítio avaliado (Estudo 3).

6 ESTUDO 1 – A FERTILIZAÇÃO MINERAL EM *Eucalyptus dunnii* ALTERA O ESTOQUE DOS NUTRIENTES EM CAMBISSOLO

Resumo: Este estudo teve como objetivo avaliar as alterações no estoque de nutrientes de um Cambissolo, em função da adição de distintas recomendações de fertilizante mineral em uma plantação de *Eucalyptus dunnii*, na região da campanha central do Rio Grande do Sul. Aos 14 meses de idade das árvores, foram coletadas amostras compostas de solo em uma trincheira, em 0 a 20, 20 a 40, 40 a 60 e 60 a 80 cm de profundidade do solo. Após a aplicação das diferentes recomendações de fertilização (T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta, respectivamente), aos 36 meses da plantação, uma trincheira foi aberta no centro de cada uma das nove parcelas, considerando as mesmas profundidades da primeira coleta. As amostras foram analisadas quanto aos valores de pH, teores de matéria orgânica, Al, Ca, Mg, P e K, sendo então calculado o estoque de nutrientes. Pode-se constatar que, antes da fertilização, o pH era ácido e os teores de matéria orgânica baixos, Ca e Mg variando de baixos a muito baixos, ao passo que, houve altas concentrações de K e P na camada superficial (0 a 20 cm de profundidade). A recomendação da fertilização padrão + 200% da mesma dose (T3) aplicada em cobertura, aliada aos efeitos residuais da calagem e da adubação pré-plantio, promoveram aumento nos teores e estoques de nutrientes do solo, especialmente de K, P, Ca e Mg.

Palavras-chave: Fertilidade do solo; nutrição florestal; potássio.

6.1 INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório “Status dos recursos mundiais de solo” (FAO, 2015), os solos são fundamentais para a vida na Terra, mas as pressões humanas sobre este recurso estão chegando a limites críticos. Aliada ao dispêndio de fertilização, a problemática envolve mudanças drásticas na qualidade edáfica, pois anualmente os cultivos agrícolas e florestais intensivos causam a perda de 5 Gt de solo através da erosão. Para tanto, preconiza-se a fertilização adequada aliada ao manejo conservacionista do solo, que consiste em uma prática sustentável e também fornece uma valiosa alavanca para a manutenção da capacidade produtiva e da biodiversidade.

O estado do Rio Grande do Sul é caracterizado pela diversidade pedológica, que ocorre em função dos diversos materiais de origem, da variabilidade climática, das formas de relevo e da variedade de organismos edáficos. No entanto, a degradação dos solos, principalmente na

região do bioma Pampa, está sendo causada pelo desenvolvimento dos processos produtivos da pecuária e agricultura mecanizada, condicionando o surgimento de ravinamento e a intensificação de fenômenos como arenização (VERDUM et al., 2014). A prática da silvicultura nestes locais sujeitos à degradação, como é o caso da região fisiográfica da campanha central, demanda planejamento criterioso quanto a fertilização, aliada às ações de cultivo mínimo e manejo de resíduos, para evitar a lixiviação e o exaurimento de nutrientes do solo (GONÇALVES et al., 2004).

Na busca por suprimento de produtos madeireiros e elevada produtividade das plantações, além do melhoramento genético, uma das práticas mais adotadas e difundidas pelos silvicultores é a fertilização mineral, que pode ser manejada de acordo com o status nutricional da espécie, volume de madeira esperado e fertilidade do solo. Especificamente para o eucalipto, os solos destinados ao seu plantio são, em geral, de baixa fertilidade, ao passo que, as técnicas de manejo florestal adotadas no cultivo da espécie no Brasil ainda são muito intensivas (BARROS et al., 2014).

Neste contexto, o conhecimento sobre os efeitos da fertilização nas reservas e no balanço de nutrientes do solo, especialmente em plantações de curta rotação, é essencial para definir práticas silviculturais conservacionistas (LEITE et al., 2010). A longo prazo, a sustentabilidade e capacidade produtiva desses ecossistemas é condicionada, provavelmente, à manutenção da matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes, principalmente em áreas onde os solos são de baixa fertilidade (BELDINI et al., 2009). Por exemplo, Laclau et al. (2010b) constataram aumento de 1/3 no volume de madeira em clones de eucalipto, quando conservada a matéria orgânica, oriunda da manutenção de resíduos, e consequentemente houve aumento da reserva de nutrientes em solos arenosos.

As mudanças nos balanços de nutrientes do solo podem afetar todos os tipos de vegetação, no entanto, estas são mais propensas a ocorrer em áreas florestais onde há exportação de biomassa e a adição de nutrientes via fertilização, que são necessárias para sustentar a produtividade. Monitorar o estoque de nutrientes do solo é de muita relevância em plantações florestais, pois consiste em um meio para avaliar a sua capacidade em manter as funções ecossistêmicas (FAO, 2015).

Em plantações florestais, onde há colheita das árvores ao final da rotação, ocorrem grandes modificações edáficas, condicionadas pelo elevado grau de perturbação antrópica, o que torna imprescindível o conhecimento das características e uso racional do solo, buscando a conservação aliada à melhoria do potencial produtivo (GONÇALVES, 2002). Para tanto, a

silvicultura demanda de técnicas e manejos eficientes, que otimizam a produção ao mesmo tempo em que conservam os recursos naturais, mantendo assim a qualidade do solo.

O solo é responsável por prover os nutrientes essenciais às plantas, que são fornecidos através da aplicação de fertilizantes, entradas via precipitação pluviométrica, intemperismo da rocha, decomposição de resíduos, sendo adsorvidos nos coloides e liberados em solução para posterior absorção radicular (TAIZ e ZEIGER, 2013; MEURER et al., 2010; BEGON et al., 2007). As características morfológicas, físicas, químicas e biológicas do solo também podem interferir na disponibilidade de nutrientes, por retê-los com maior ou menor energia, influenciar o crescimento radicular, prover o transporte dos nutrientes em direção à superfície das raízes, dentre outros fatores (BARROS et al., 2014).

As modificações das características edáficas nas distintas classes de solo, condicionadas pela fertilização mineral e prática da silvicultura, assim como as consequências resultantes dessas alterações sobre a sustentabilidade do processo de produção do eucalipto, ainda são pouco conhecidas (LEITE et al., 2010). Conforme afirma Lima (1996), os estudos envolvem as propriedades químicas do solo em povoamentos florestais, voltados às detecções nas alterações de pH, conteúdo de matéria orgânica, estoque de nutrientes, capacidade de troca de cátions, dentre outros aspectos, podem indicar o efeito das plantações de eucalipto e da aplicação de fertilizantes na qualidade do solo.

Este trabalho teve como objetivo avaliar as mudanças ocorridas na fertilidade de um Cambissolo após a aplicação de diferentes recomendações de fertilizante em cobertura, em uma plantação de *Eucalyptus dunnii*, na região da campanha central do Rio Grande do Sul.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

6.2.1 Coleta e análise química do solo

Para caracterização química do solo antes da aplicação das recomendações de fertilizantes, aos quatorze meses de idade da plantação, foram coletadas amostras nas camadas de 0 a 20, 20 a 40, 40 a 60 e 60 a 80 cm de profundidade do solo, por meio da abertura de uma trincheira. Aos 36 meses da plantação, 22 meses após a aplicação das fertilizações (T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta, respectivamente), uma trincheira foi aberta no centro de cada uma das nove parcelas (Figura 6), compreendendo três repetições por tratamento, considerando as mesmas profundidades da primeira coleta.

Depois de passar por secagem em estufa de circulação de ar, a 40 ºC, até atingir peso constante, e peneirado em malha de 2 mm de abertura, todas as amostras de solo foram analisadas quanto aos valores de pH em água, conteúdo de matéria orgânica, alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), CTC efetiva (t), saturação por bases (V) e por alumínio (m).

Para estimativa da concentração de N no solo, foi assumido o valor de 10% do teor de matéria orgânica (GONÇALVES et al., 2001). Já o cálculo do estoque de nutrientes no solo foi realizado por meio da obtenção do produto entre o volume de solo, a concentração de cada nutriente e a densidade de solo (Tabela 1). As análises químicas do solo, aos 14 meses após o plantio, foram realizadas no Laboratório de Ecologia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, já as amostras coletadas aos 36 meses foram analisadas no Laboratório de Solos da UFSM, segundo a metodologia de Tedesco et al. (1995).

6.2.2 Análise dos dados

A análise química do solo foi interpretada de acordo com o "Manual de Adubação e de Calagem" para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, sugerida pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFS, 2016). Para a detecção de diferenças estatísticas entre os contrastes de médias de cada profundidade do solo, nos três tratamentos, aplicou-se o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, após o atendimento dos pressupostos de homogeneidade de variâncias e normalidade dos erros, comprovados através dos testes de Bartlett e Shapiro-Wilk, respectivamente. Estas análises foram executadas com auxílio do programa Assistat versão 7.7, considerando o delineamento inteiramente casualizado (SILVA e AZEVEDO, 2016).

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes da fertilização mineral de cobertura (Tabela 3), o solo apresentou baixo teor de matéria orgânica (≤ 2,5%), assim como pH muito baixo em todas as profundidades, tanto quanto baixos teores de cálcio e magnésio. Também houve teor muito alto de fósforo em até 20 cm de profundidade, passando para a classificação baixo na camada de 20 a 40 cm e muito baixo de 40 a 80 cm do perfil. Para o potássio em até 20 cm, os teores são altos e de 20 a 80 cm de profundidade estes são médios (CQFS, 2016). Os valores da CTC efetiva são considerados baixos, em função da composição textural do solo ser predominantemente arenosa (TEDESCO et al., 1995).

Tabela 3- Caracterização da fertilidade do Cambissolo em plantação de *Eucalyptus dunnii* antes da aplicação de fertilização mineral em cobertura

Prof. (cm)	MO	N	pH	Al^{3+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	t	P*	K^{+}	V	m
	%	g kg^{-1}	(H_2O)	----------$cmol_c$ dm^{-3}----------				--mg dm^{-3}--		----%----	
0 a 20	1,4	1,4	4,5	0,8	0,40	0,13	1,6	32,8	63,9	43,1	54,2
20 a 40	1,1	1,1	4,7	0,9	0,32	0,06	1,4	7,4	56,2	37,1	63,0
40 a 60	1,0	1,0	4,7	0,8	0,32	0,06	1,3	4,8	59,5	40,8	59,4
60 a 80	0,8	0,8	4,7	1,1	0,34	0,05	1,6	2,2	47,9	31,9	68,5

Onde: Matéria Orgânica (MO); CTCefetiva (t); P* extraído pelo método Melich1; Saturação por bases (V); Saturação por alumínio (m).
Fonte: (Autor, 2018)

Neste Cambissolo sob a plantação de *Eucalyptus dunnii* também se verificou baixa saturação por bases (< 50%) e alta saturação por alumínio, provavelmente condicionada pelos menores valores de pH, que favoreceram a solubilização do Al (FARIA et al., 2009). O alumínio pode ser prejudicial à nutrição das plantas, pois é um elemento trivalente sendo adsorvido preferencialmente aos demais íons, como cálcio, magnésio e potássio (DECHEN e NACHTIGALL, 2007). No entanto, altos teores de Al não são limitantes ao crescimento do *Eucalyptus*, uma vez que as espécies do gênero são altamente tolerantes à presença deste elemento no solo (NEVES et al., 1982).

A análise química evidenciou os efeitos residuais da adubação realizada antes do plantio das mudas, conforme detalhado na “Metodologia geral”, refletindo o aumento dos teores de fósforo e potássio nas camadas superficiais do solo. Segundo Malavolta (2006), o efeito residual da adubação de plantio é de três anos ou mais. Maluf et al. (2015) ainda relatam que os teores de fósforo disponíveis são maiores em solos arenosos, quando comparado aos argilosos, especialmente onde houve adição do elemento via fonte inorgânica, pois a imobilização por processos biológicos (microbiana) e químicos (complexação com Fe, Al e Ca) tende a ser menor.

Na silvicultura operacional do eucalipto, comumente são aplicadas maiores quantidades de fósforo na fertilização pré-plantio (SILVA et al., 2013; DIAS et al., 2014; FERNANDEZ et al., 2000) e estudos comprovaram que a adubação fosfatada adequada aumentou em 30% o percentual de sobrevivência das mudas de *Eucalyptus urograndis* no campo (ROCHA et al.,

2013). Plantas jovens de eucalipto possuem uma grande exigência por este nutriente na fase de implantação, sendo que, as limitações na disponibilidade de P podem resultar em restrições no desenvolvimento, condicionada pela redução na fotossíntese e respiração, das quais a planta não se recupera posteriormente. No entanto, o nível crítico de P diminui com o aumento da idade das árvores (DIAS et al., 2015; GRANT et al., 2001).

O fósforo é um nutriente indispensável à nutrição e produtividade florestal e sua correta recomendação deve ser preconizada nos programas de fertilização, pois em função de suprimentos adequados deste nutriente no solo, maiores volumes de madeira foram obtidos em *Eucalyptus grandis* (BELLOTE e FERREIRA, 1993) e *Eucalyptus saligna* (SGARBI et al., 2000a). Relações sinérgicas entre os nutrientes também reforçam a necessidade da fertilização mineral, por exemplo, em situações onde há deficiência de fósforo no solo, a absorção de nitrogênio é limitada, comprometendo a produção de biomassa e produtividade em *Eucalyptus cloeziana, Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus grandis* (GRESPAN et al., 1998).

Cabe ressaltar a importância do manejo da fertilização, pois menos de 30% do fósforo fornecido é absorvido pelas plantas, por causa das reações de fixação com os óxidos de ferro e alumínio, que formam compostos insolúveis e imóveis, implicando em baixa mobilidade deste nutriente no solo (MALAVOLTA, 2006; NOVAIS et al., 2007). No caso do Cambissolo, a lixiviação e imobilização de fósforo é menor, pois é uma classe de solo menos intemperizado, consequentemente, maior é a disponibilidade à planta (NOVAIS et al., 2007).

Além de distrófico, o solo da área de estudo é ácido, o que pode ser reflexo da absorção de cátions pelo sistema radicular, combinada à entrada de elementos minerais (ânions), provenientes das lavagens de folhas da copa e do tronco pela água da precipitação pluviométrica (FARIA et al., 2009). A baixa fertilidade do solo na área de estudo, situação típica dos solos da região da campanha no bioma Pampa (VERDUM et al., 2014; STRECK et al., 2008), também está vinculada ao predomínio da fração areia na composição do solo (Tabela 1) e ao baixo teor de matéria orgânica, o que condicionou menor adsorção e retenção dos nutrientes nos coloides (SILVA e MENDONÇA, 2007; MEURER et al., 2010).

Após 22 meses da aplicação das recomendações do fertilizante mineral em cobertura, pode-se verificar que os teores de matéria orgânica, N e alumínio são menores na profundidade de 60 a 80 cm no solo onde houve adição do T1. Já para o K, foram detectadas diferenças entre os tratamentos, sendo que, os maiores teores deste nutriente foram observados na camada superficial (0 a 20 cm) e subsuperficial (40 a 60 cm) no solo onde houve fertilização com 176 kg ha^{-1} de K (T3), em contrapartida, os menores teores foram constatados no tratamento onde aplicou-se somente a recomendação da fertilização padrão (T1) (Tabela 4).

Tabela 4 - Fertilidade do Cambissolo em plantação de *Eucalyptus dunnii* submetida a diferentes recomendações de fertilização mineral em cobertura

	Prof.	MO	N	pH	Al^{3+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	t	[1/]P	K^+	V	m
	(cm)	%	g kg^{-1}	H_2O	----------$cmol_c$ dm^{-3}----------				------mg dm^{-3}------		---------%-------	
T1	0 a 20	[2/]1,1±0,2 a	1,1±0,2 a	4,5±0,1a	0,8±0,1a	0,7±0,01a	0,3±0,07a	2,0±0,1a	42,0±23,8a	38,7±2,3b	57,5±5,2a	41,6±4,3a
	20 a 40	0,9±0,2a	0,9±0,2a	4,2±0,0a	2,0±0,4a	0,2±0,07a	0,09±0,03a	2,4±0,5a	19,8±3,2a	37,3±6,1b	14,5±0,3a	85,9±0,8a
	40 a 60	0,5±0,1a	0,5±0,1a	4,3±0,1a	1,8±0,5a	0,2±0,1a	0,04±0,02a	2,1±0,5a	16,3±2,4a	33,3±8,3b	15,1±6,0a	84,4±6,2a
	60 a 80	0,2±0,06c	0,2±0,06c	4,4±0,1a	1,7±0,1b	0,4±0,3a	0,1±0,1a	2,3±0,6a	14,9±9,5a	42,7±8,3a	24,4±13,0a	76,1±14,0a
T2	0 a 20	1,2±0,06a	1,2±0,06a	4,2±0,2a	1,4±0,5a	0,4±0,1a	0,2±0,07a	2,2±0,3a	46,3±23,9a	46,7±2,3b	34,9±5,2a	63,5±4,3a
	20 a 40	1,5±0,3a	1,5±0,3a	4,2±0,2a	3,1±0,7a	0,2±0,09a	0,1±0,07a	3,6±0,8a	23,7±9,5a	62,7±16,2a	14,8±2,2a	86,0±1,9a
	40 a 60	1,6±0,9a	1,6±0,9a	4,2±0,1a	2,8±0,5a	0,2±0,1a	0,07±0,01a	3,3±0,6a	14,3±10,0a	49,3±4,6ab	12,5±2,3a	86,8±2,3a
	60 a 80	0,8±0,06a	0,8±0,06a	4,2±0,06a	3,0±0,5a	0,4±0,4a	0,07±0,03a	3,6±0,5a	15,0±2,6a	54,7±10,1a	16,8±10,6a	83,9±10,5a
T3	0 a 20	1,2±0,1a	1,2±0,1a	4,4±0,3a	1,0±0,5a	0,7±0,3a	0,4±0,2a	2,2±0,2a	40,4±1,6a	57,3±2,3a	57,3±2,3a	43,1±21,5a
	20 a 40	1,4±0,4a	1,4±0,4a	4,2±0,2a	2,7±0,8a	0,4±0,3a	0,1±0,04a	3,3±1,1a	25,7±10,9a	58,7±2,3ab	19,1±3,6a	81,0±4,7a
	40 a 60	0,8±0,06a	0,8±0,06a	4,3±0,1a	2,3±0,6a	0,2±0,1a	0,05±0,0a	2,7±0,5a	18,2±6,1a	72,0±16,0a	17,2±8,9a	83,4±8,3a
	60 a 80	0,4±0,1b	0,4±0,1b	4,5±0,2a	1,9±0,6ab	0,2±0,1a	0,05±0,02a	2,4±0,4a	13,4±9,0a	60,0±10,6a	19,4±10,5a	79,4±10,3a

Onde: T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta; Matéria Orgânica (MO); CTCefetiva (t); [1/]P extraído pelo método Melich1; Saturação por bases (V); Saturação por alumínio (m). [2/]Médias (± desvio padrão), dentro da mesma profundidade, não diferem entre os tratamentos quando seguidas pela mesma letra, na coluna, pelo teste Tukey (α 5%). Fonte: (Autor, 2018)

Após 36 meses do plantio e sob diferentes recomendações de fertilização, os teores de matéria orgânica, cálcio e magnésio continuaram baixos e o pH deste solo distrófico ainda é ácido, em todos os tratamentos e profundidades. O conteúdo de fósforo variou de muito alto a alto em até 60 cm do solo e médio na profundidade 60 a 80 cm. Para o potássio, onde houve fertilização com T2, os teores até os 20 cm de profundidade são médios e passaram para altos em até 40 cm. Já no T3, há altos teores de K na profundidade de 40 a 80 cm e nas demais camadas são considerados médios. No solo fertilizado com T1, em 0 a 60 cm de profundidade, os teores de K são baixos e de 60 a 80 cm são médios (CQFS, 2016).

Para o eucalipto, visando a máxima produtividade de 50 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, somente os níveis de P e Mg estão dentro do limite considerado adequado para o alcance deste resultado, ao passo que, os teores ideais de K e Ca, em até 20 cm de profundidade do solo, deveriam ser de 90 mg dm^{-3} e 0,8 $cmol_c$ dm^{-3}, respectivamente. Após a aplicação dos tratamentos, devido às condições de fertilidade deste Cambissolo, espera-se que a produtividade das árvores de *Eucalyptus dunnii* nesta área de estudo atinja cerca de 30 a 40 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, segundo a prospecção definida por Novais et al. (1986).

Quando comparado à avaliação da fertilidade do solo antes da aplicação do fertilizante, pode-se constatar que o pH ficou levemente mais ácido em todos os tratamentos, especialmente nas camadas mais superficiais. Isto se deve, provavelmente, em virtude da maior absorção de bases pelas raízes finas, mais concentradas em até 20 cm de profundidade do solo (DICK et al., 2016a). Exceto para T2, os teores de cálcio e magnésio aumentaram em até 20 cm de profundidade, o que pode estar vinculado ao efeito residual da aplicação de 2 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico antes do plantio das mudas. Os teores destes nutrientes podem ser otimizados em longo prazo, pois houve manutenção do resíduo da rotação anterior sobre o solo. Isso já foi observado após 83 meses do corte raso de *Eucalyptus grandis*, onde a fertilização e a manutenção dos resíduos da colheita florestal elevaram os teores de Ca e Mg trocáveis no solo (PAES et al., 2013).

Também pode-se observar efeito residual e aumento nos teores de fósforo em todas as profundidades do solo, indicando que há ação do fertilizante e disponibilização mesmo após 36 meses da aplicação de 47 kg ha^{-1} de P no pré-plantio. Constatou-se que houve percolação de fósforo para as camadas subsuperficiais, sendo que, a dose aplicada pode ser considerada adequada para o suprimento nutricional, pois apesar da demanda absorvida pela planta, ainda manteve altos níveis de P disponíveis no solo, não havendo necessidade de reposição em cobertura.

Em relação ao K, os maiores teores no solo estiveram relacionados às recomendações T2 e T3 de fertilização em cobertura. No entanto, estes teores se assemelharam àqueles observados aos 14 meses pós-plantio, ou seja, a fertilização não promoveu aumento, mas foi suficiente para manter os níveis adequados de K no solo durante 22 meses. Este efeito pode ser corroborado pelos baixos teores de K onde se aplicou somente a fertilização padrão (T1), pois à medida em que aconteceram as absorções radiculares e translocação para a biomassa das árvores, o suprimento reduziu em até 60 cm de profundidade do solo. As maiores concentrações passaram das camadas superficiais para as subsuperficiais, indicando a ocorrência da rápida lixiviação e acentuada mobilidade vertical do potássio (ERNANI et al., 2007).

Apesar da manutenção dos resíduos sobre o solo, oriundos da primeira rotação conduzida na área de estudo, cabe destacar que, 36 meses após o plantio ainda não houve aumento nos conteúdos de matéria orgânica e nitrogênio, o que pode estar relacionado à baixa diversidade de artrópodes epigéicos na interface solo-serapilheira, condicionando menor fragmentação dos restos vegetais (DICK et al., 2016d). A adição da fertilização mineral incorpora ao solo elevadas quantidades de sais, o que também pode estar inibido a transformação e a decomposição da matéria orgânica (CORREIA e ANDRADE, 2008).

À medida em que houver a decomposição da serapilheira produzida e dos resíduos, espera-se que a fertilidade seja otimizada em função da liberação de nutrientes no solo. Esta relação foi observada em rebrota de *Eucalyptus grandis*, onde houve aumento nos teores de potássio no solo após a gradagem, que revolveu e incorporou matéria orgânica oriunda dos resíduos da colheita anterior, serapilheira em decomposição e resíduos de fertilizantes (CAVICHIOLLO et al., 2004). A combinação da manutenção de resíduos e fertilização mineral adequada é uma das estratégias conservacionistas da qualidade de solo. Por exemplo, a aplicação de 200 kg ha^{-1} de N-P_2O_5-K_2O 06:26:13 em pré-plantio de *Eucalyptus grandis*, desde que mantido todo resíduo da colheita anterior sobre Latossolo, condicionou aumento expressivo nos teores de nutrientes do solo, onde a avaliação realizada após 83 meses da fertilização, indicou acréscimo de 550%, 33%, 130% e 68% nas quantidades de fósforo, potássio, cálcio e magnésio, respectivamente (PAES et al., 2013).

Tanto quanto no presente estudo, maiores valores de P, Ca e Mg nas camadas superficiais e de Al nas camadas subsuperficiais também foram constatados por Faria et al. (2009), em plantação de *Eucalyptus urograndis*, após sete anos de cultivo sobre Argissolo. Após três anos de cultivo também houve redução dos valores de pH e potássio nas camadas mais superficiais do solo, ao passo que, o teor de alumínio, matéria orgânica e fósforo aumentaram em maiores profundidades, indicando efeito residual das fertilizações (300 kg ha^{-}

[1] de N-P_2O_5-K_2O 06-30-06 pré-plantio; 140 kg ha^{-1} de N-P_2O_5-K_2O 22-05-20 aos 90 dias e 22-00-18 aos 270 dias) em uma plantação de *Eucalyptus dunnii*, na região da campanha sudoeste do bioma Pampa (DICK et al., 2016b).

Em Cambissolo cultivado durante 29 anos com *Eucalyptus grandis*, onde houve fertilização de pré-plantio com N-P_2O_5-K_2O 05-25-10 (90 g $planta^{-1}$) e de cobertura após seis meses com N-P_2O_5-K_2O 10-20-10 (100 g $planta^{-1}$), Leite et al. (2010) também constataram que houve redução nos valores de pH e teores de Ca, Mg e K, além de aumentos nos teores de P e Al. Os autores apontaram para a necessidade de programas de fertilização que visam a prevenção de limitações nutricionais e exaustão de minerais do solo.

Nos estoques de nutrientes (Tabela 5) também constatou-se que, após a fertilização, as quantidades de K reduziram, mas P, Ca e Mg aumentaram nos primeiros 20 cm de profundidade. De maneira geral, há maior estoque de K e Ca no solo que recebeu a recomendação T3 e a maior quantidade dos nutrientes está presente nas camadas superficiais do solo (até 40 cm de profundidade).

Tabela 5 - Estoques de nutrientes no Cambissolo em plantação de *Eucalyptus dunnii* antes e depois da fertilização mineral de cobertura

	Prof. (cm)	N	P	K	Ca	Mg
		kg ha^{-1}				
AF	0 a 20	4060,0	95,1	185,3	23,2	7,5
	20 a 40	3278,0	22,0	167,5	19,1	3,5
	40 a 60	3060,0	14,7	182,1	19,6	3,6
	60 a 80	2528,0	6,9	151,4	21,5	3,1
	Total	**12926,0**	**138,7**	**686,3**	**83,4**	**17,7**
T1	0 a 20	3190,0	121,8	112,2	41,8	19,1
	20 a 40	2682,0	57,4	108,2	9,5	5,4
	40 a 60	1530,0	47,3	96,6	12,2	2,4
	60 a 80	632,0	43,2	123,8	23,4	8,2
	Total	**8034,0**	**269,7**	**440,8**	**86,9**	**35,1**
T2	0 a 20	3480,0	134,3	135,4	24,9	11,0
	20 a 40	4470,0	70,6	181,8	14,9	7,2
	40 a 60	4896,0	43,8	143,0	13,5	4,3
	60 a 80	2528,0	47,4	158,6	26,5	4,4
	Total	**15374,0**	**296,1**	**618,8**	**79,8**	**26,9**
T3	0 a 20	3480,0	117,2	166,2	43,5	22,0
	20 a 40	4172,0	74,5	170,2	23,2	7,2
	40 a 60	2448,0	52,8	208,8	12,9	3,1
	60 a 80	1264,0	38,9	174,0	14,5	3,2
	Total	**11364,0**	**283,4**	**719,2**	**94,1**	**35,5**

Onde: AF = antes da fertilização mineral em cobertura; Tratamentos T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta;
Fonte: (Autor, 2018)

O maior estoque de nutrientes ocorreu nas menores profundidades do solo pois, é nesta região onde se concentraram as raízes finas da plantação de *Eucalyptus dunnii* (DICK et al., 2016a), que são responsáveis pela absorção de água e nutrientes (TAIZ e ZEIGER, 2013). O estoque de nutrientes também pode variar em função da classe e densidade de solo, fertilização e idade da plantação. Por exemplo, em estudo com *Eucalyptus grandis*, aos oito anos de idade, em Argissolo distrófico sem aplicação de fertilizante, as quantidades de P, K, Ca, Mg acumuladas em até 80 cm de profundidade do solo foram de 13,9; 1079,9; 872,2 e 320,4 kg ha^{-1}, respectivamente (CUNHA et al., 2005). Já em Latossolo distrófico, onde houve aplicação de 500 kg ha^{-1} de superfosfato simples e 280 g $planta^{-1}$ de N-P_2O_5-K_2O 20:05:20, em *Eucalyptus urograndis*, o estoque de P, K, Ca, Mg e S acumulado no solo, após cinco anos de cultivo, foi de 20, 280, 220, 110 e 30 kg ha^{-1}, respectivamente (GATTO et al., 2014).

Cabe ressaltar que, além da fertilização, a manutenção dos resíduos da rotação anterior sobre o solo também contribui para a melhoria na fertilidade, especialmente na camada superficial. No decorrer do processo de decomposição e mineralização da cepa remanescente e restos culturais provenientes da colheita, há liberação de nutrientes da matéria orgânica para o solo, os quais são absorvidos pelas plantas de eucalipto (FARIA et al., 2009). A matéria orgânica do solo, além de aumentar a capacidade de troca de cátions, complexa elementos tóxicos e micronutrientes (BAYER e MIELNICZUK, 2008). Também está diretamente relacionada à vegetação, pois as maiores concentrações de carbono orgânico foram responsáveis pelo aumento na produtividade de *Eucalyptus grandis* (LOUW, 1997).

A medida em que novas rotações serão cultivadas na área de estudo, em longo prazo espera-se que os teores de matéria orgânica no solo aumentem, ao passo que ocorrerá a decomposição dos resíduos e serapilheira. O efeito do tempo sobre a fertilidade de Cambissolo pôde ser observado após 29 anos de cultivo de *Eucalyptus grandis*, onde os teores de matéria orgânica foram recuperados em comparação a solos sob pastagens degradadas, entretanto, ainda não se equiparam aos níveis da floresta nativa (LEITE et al., 2010).

6.4 CONCLUSÕES

O Cambissolo é ácido, distrófico e de elevada saturação por alumínio, mas com altos teores de fósforo e potássio na camada superficial (0 a 20 cm). A recomendação da fertilização padrão + 200% da dose aplicada em cobertura (T3), aliada aos efeitos residuais da calagem e da adubação pré-plantio, promoveram aumento nos teores e estoques de nutrientes no solo, especialmente de K, P, Ca e Mg.

7 ESTUDO 2 – EFEITOS DA FERTILIZAÇÃO MINERAL DE COBERTURA NA PRODUTIVIDADE, ESTOQUES DE NUTRIENTES E CARBONO NA BIOMASSA DE *Eucalyptus dunnii*

Resumo: A produtividade, biomassa, carbono e estoque de nutrientes nos componentes folhas, galhos, casca da madeira e madeira do tronco foram avaliadas em árvores jovens de *Eucalyptus dunnii*, após aplicação de diferentes recomendações de fertilização (T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta, respectivamente), em cobertura. Para avaliação da produtividade, variáveis dendrométricas como diâmetro à altura do peito (DAP, em cm), altura total (h, em m) e volume (m³ ha^{-1} e m³ árv.$^{-1}$) foram obtidas. Para a determinação da biomassa, foram abatidas três árvores de DAP médio em cada tratamento, de onde se obteve o peso de cada componente, bem como análises químicas para quantificação de carbono e concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, e determinações dos estoques. Até os 36 meses de idade do *Eucalyptus dunnii*, a recomendação da fertilização padrão + 200% da mesma dose (T3), em cobertura, promoveu maior altura das árvores e, em função desta variável houve aumento no volume (m³ árv.$^{-1}$), em comparação ao T1, no entanto, o DAP não diferiu entre tratamentos. A alocação média de biomassa e C foi de 58,7 Mg ha^{-1} e 26,9 Mg ha^{-1} respectivamente, e ambos não variaram em função dos tratamentos. A tendência de acúmulo de biomassa foi: madeira do tronco > galhos > casca do tronco > folhas e de C foi madeira do tronco > galhos > folhas > casca do tronco. Em relação às concentrações dos nutrientes, estas variaram em função do componente da árvore, com maiores valores nas folhas e menores na madeira do tronco, no entanto, maiores recomendações de fertilização não influenciaram as concentrações de macronutrientes. Na biomassa total, houve estoque médio de 175,8; 25,4; 198,4; 231,6; 75,1 e 17,2 kg ha^{-1} de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente, já para B, Cu, Fe, Mn e Zn, as quantidades médias estocadas foram de 391,5; 143,0; 2064,2; 12694,8 e 471,5 g ha^{-1} e, com exceção de Ca e Mn, na madeira do tronco há maior acúmulo de nutrientes. De forma geral, as diferentes recomendações de fertilização mineral não promoveram efeitos significativos sobre os parâmetros avaliados. A produtividade e produção de biomassa obtidas neste sítio foram satisfatórias, sendo assim, a fertilização padrão (T1 = 150 g planta^{-1} de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24), em cobertura, pode ser recomendada para a condução de plantações de *Eucalyptus dunnii* em Cambissolo, na região da campanha central do bioma Pampa.

Palavras-chave: ciclagem de nutrientes; nutrição florestal; volume de madeira.

7.1 INTRODUÇÃO

Avaliar a biomassa produzida em plantações florestais, bem como as quantidades de nutrientes alocadas em cada componente da árvore é primordial à silvicultura, pois por meio destas informações é possível planejar a execução de técnicas voltas à conservação da capacidade produtiva dos solos (VIERA et al., 2013a). Atualmente, uma destas estratégias consiste no manejo correto da fertilização pois, até a segunda metade do século 20, os maiores rendimentos de biomassa vegetal foram alcançados em função do uso indiscriminado de adubos nitrogenados e fosfatados, o que atualmente é considerado insustentável no âmbito econômico e ambiental (FAO, 2015).

Maximizar a produtividade e a qualidade das plantações de eucalipto se justifica pela relevância que esta cultura tem para o Brasil, pois é a base que abastece de matéria-prima grandes empreendimentos industriais (celulose, papel, carvão vegetal e siderurgia), além de contribuir para a conservação ambiental de espécies nativas (RESENDE et al., 2014). Neste contexto, a fertilização em plantações florestais é imprescindível, pois a silvicultura é praticada, geralmente, em solos de baixa fertilidade (BARROS et al., 2014). Além disto, após o término da rotação, a exportação de nutrientes via colheita é elevada, sendo intensificada quando há remoção de biomassa total, o que acaba comprometendo a produtividade futura e qualidade destes sítios (SANTANA et al., 2008). Este cenário pode ser otimizado se houver somente a retirada da madeira do tronco, prática recomendada no manejo conservacionista, o que representa expressiva redução dos nutrientes exportados no sistema, proporcionando maior sustentabilidade da produção florestal (GATTO et al., 2014).

Quando é intensa a remoção dos nutrientes pela colheita da biomassa, grandes quantidades de fertilizantes deverão ser utilizadas para reestabelecer o equilíbrio nutricional e garantir a produtividade florestal nos próximos ciclos de produção (GUIMARÃES et al., 2015). Na eucaliptocultura, a fertilização pode influenciar a produção e alocação de nutrientes na biomassa em árvores jovens (SILVA et al., 2013), somada às condições climáticas (BINKLEY et al., 2017), idade e espécie (LACLAU et al., 2000; TURNER e LAMBERT, 2008), classe de solo (VIERA et al., 2017), tipo de preparo de solo (BAPTISTA e LEVIEN, 2010), local e disponibilidade hídrica (STAPE et al., 2010).

Já as concentrações de nutrientes na biomassa podem variar em função do material genético, solo, clima, práticas silviculturais e incidência de doenças e/ou pragas (SILVEIRA et al., 2004). Os nutrientes atuam em vários processos metabólicos e, juntamente com água,

radiação solar, temperatura e oxigênio, compõem os fatores determinantes do crescimento vegetal (BARROS et al., 2014) e da produtividade florestal (SANTANA et al., 2014). A demanda de nutrientes pela planta depende da taxa de crescimento e da eficiência de conversão em biomassa, sendo que, baixas concentrações de nutrientes condicionam redução no crescimento, influenciando diretamente a produtividade final (TAIZ e ZEIGER, 2013; BARROS et al., 2004). Para tanto, conhecer os nutrientes absorvidos e translocados pela planta é importante para definir a fase de maior demanda e, eventualmente, fertilizar no período mais crítico (SANTANA et al., 2008).

Cabe ressaltar ainda que, a finalidade das plantações florestais não está somente atrelada à produção de madeira para geração de energia, celulose e papel, dentre outros produtos, mas também à função de alocar carbono extraído da atmosfera, utilizado em processos metabólicos da planta. O carbono (C) é incorporado nos diferentes componentes da biomassa (TURGILHO et al., 2010; LOPES e ARANHA, 2006), e a quantidade acumulada pode variar em função da espécie e idade da árvore (GATTO et al., 2011; ASSIS et al., 2015).

O setor florestal desponta como uma das alternativas viáveis para mitigar o aumento da concentração de CO_2 na atmosfera, via fixação do carbono pelas árvores de eucalipto (GATTO et al., 2011). O objetivo deste estudo foi avaliar a influência da aplicação de diferentes recomendações de fertilização mineral, em cobertura, sobre a produtividade, produção de biomassa acima do solo, alocação de nutrientes e carbono em cada componente das árvores de *Eucalyptus dunnii*, na região da campanha do bioma Pampa.

7.2 MATERIAL E MÉTODOS

7.2.1 Avaliação do crescimento e produtividade

Antes da aplicação dos tratamentos, aos quatorze meses após o plantio, de todas as árvores de *Eucalyptus dunnii* contidas nas nove parcelas (Figura 6) foram tomadas medidas quanto à altura total (h, em m), com auxílio de régua graduada e diâmetro à altura do peito (DAP, em cm, mensurado a 1,30 m de altura em relação ao nível do solo), com uso de fita dendrométrica.

Aos 36 meses de idade das árvores, passado o período de 22 meses da aplicação das diferentes recomendações de fertilização em cobertura (T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta, respectivamente), em cada parcela foi considerada a

bordadura dupla e obteve-se todas as medidas de DAP e altura de 20% das árvores, determinada com uso do hipsômetro (Vertex).

Para a estimativa das alturas não mensuradas em campo foram testados modelos de regressão, tendo como parâmetros para escolha do melhor ajuste os condicionantes de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da estimativa ($Syx_{\%}$). Dentre os modelos, o quadrático foi o que melhor se ajustou (R^2aj. = 0,89; Syx% = 9,01) para a estimativa das alturas, onde $h = B_0 + B_1*DAP + B_2*DAP^2$, com os coeficientes da regressão B_0 = 13,36967; B_1 = -0,214150; B_2 = 0,03304.

Sabendo-se o número médio de árvores por hectare (N), conforme a metodologia descrita em Péllico Neto e Brena (1997), calculou-se a área basal do povoamento (G; m^2 ha^{-1}) e obteve-se o volume médio por hectare, com casca, através da fórmula: $V = [(DAP/100)^2 \times \pi/4] \times h \times f$, onde: V= Volume total com casca (m^3 ha^{-1}); DAP = Diâmetro à altura do peito (cm); h = Altura total (m); f = fator de forma 0,5 (FINGER et al., 1995). Para cálculo do volume individual (V'; m^3 árv.$^{-1}$), dividiu-se o volume total pelo número de árvores por hectare.

7.2.2 Quantificação da biomassa, estoque de nutrientes e carbono

Após a fertilização em cobertura, para a amostragem da biomassa acima do solo, realizada aos 36 meses da plantação de *Eucalyptus dunnii*, foram consideradas as informações quanto aos valores de diâmetro à altura do peito (DAP) médios, mensurados em cada uma das nove unidades amostrais e realizou-se então o seccionamento ao nível do solo, de uma árvore de DAP médio por parcela, resultando assim em três repetições por tratamento. Após o corte, procedeu-se com o fracionamento dos componentes das árvores, que compreenderam: madeira do tronco, casca do tronco, galhos e folhas, que foram totalmente pesados em campo, com auxílio de balança de gancho (Apêndice A). Depois de obtido o peso úmido, para posterior análise dos concentrações dos nutrientes, foram coletadas alíquotas de 150 g de folhas e galhos, já para a madeira do tronco e a casca do tronco foram coletados discos, retirados através de pontos de amostragem distribuídos ao longo do comprimento do fuste, nas posições medianas das secções, resultantes da divisão em três partes iguais do mesmo.

Estas amostras foram processadas no Laboratório de Ecologia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, passando por secagem em estufa de circulação forçada de ar, a 70 ºC, até atingir peso constante, com posterior pesagem em balança de precisão (0,01 g), determinando-se o peso seco. Em seguida, as amostras passaram por moinho tipo *Willey* e foram encaminhadas para a determinação analítica das concentrações de macro e micronutrientes,

segundo metodologias de Tedesco et al. (1995). Os teores de boro (B) foram determinados após digestão seca e para os nutrientes cálcio (Ca), magnésio (Mg), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), potássio (K), fósforo (P) e enxofre (S), a digestão utilizada foi a nítrica-perclórica (HNO_3 + $HClO_4$, na proporção 3:1), determinados por espectrofotometria. Já o C e teor total de N foram determinados no Laboratório de Biotransformações de Carbono e Nitrogênio (LABCEN/UFSM), com analisador elementar (modelo Flash EA 1112, Thermo Finnigan, Milão, Itália para determinar C e, Flash EA 1112, Thermo Electron Corporation, Bremen, Germany para N).

Para a estimativa da biomassa total da plantação de *Eucalyptus dunnii*, multiplicou-se a massa individual de cada árvore de DAP médio pelo número total de árvores da parcela, e posteriormente ponderou-se por hectare (Mg ha^{-1}). Já o estoque de nutrientes, acumulado em cada componente da árvore, foi calculado por meio do produto entre a concentração de nutrientes e os respectivos valores de biomassa.

7.3 Análise estatística

Para detecção de contraste entre as médias das variáveis dendrométricas de diâmetro à altura do peito, altura e volume individual em cada tratamento, foi aplicado o teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade de erro, no delineamento inteiramente casualizado (DIC) com diferentes números de repetições. Para detecção dos contrastes entre médias das concentrações de nutrientes nos diferentes componentes da biomassa e entre cada um dos tratamentos, utilizou-se o teste de Tukey (α = 5%), no DIC. Todas as análises foram realizadas com auxílio do *software* Assistat versão 7.7 (SILVA e AZEVEDO, 2016).

7.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.4.1 Crescimento e produtividade

Antes da fertilização mineral de cobertura não foram observadas diferenças ($p < 0,05$) entre os valores de DAP, altura e volume individual entre as árvores de *Eucalyptus dunnii*. No entanto, com a recomendação de 450 g $planta^{-1}$ de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 (T3) houve maior volume produzido por árvore, condicionado pelas maiores alturas, quando comparada à fertilização padrão de cobertura (T1), ao passo que, T2 não diferiu de T3 e T1 (Tabela 6).

Tabela 6 - Número de indivíduos (N), valores médios (± desvio padrão) de diâmetro à altura do peito (DAP) e altura (h), área basal por hectare (G), volume com casca por hectare (V) e por árvore (V') em plantação de *Eucalyptus dunnii* antes e após fertilização mineral em cobertura.

	Tratamento	N	DAP	h	G	V	V'
		árv ha^{-1}	cm	m	m² ha^{-1}	m³ ha^{-1}	m³ árv^{-1}
14 meses (AF)	**T1**	1.317	3,9 ± 1,3 a	4,5 ± 0,9 a	1,64	3,71	0,0034 ± 0,002 a
	T2	1.389	4,0 ± 1,3 a[1/]	4,5 ± 1,0 a	1,77	4,00	0,0034 ± 0,002 a
	T3	1.283	4,2 ± 1,2 a	4,6 ± 0,9 a	1,76	4,11	0,0037 ± 0,002 a
36 meses	**T1**	1.183	12,1 ± 1,5 a	15,7 ± 0,9 b	13,67	107,07	0,0931 ± 0,02 b[2/]
	T2	1.217	12,7 ± 1,9 a	15,8 ± 1,3 ab	15,52	123,45	0,1052 ± 0,03 ab
	T3	1.067	12,8 ± 1,6 a	16,4 ± 1,4 a	13,58	111,16	0,1069 ± 0,03 a

[1/]Para cada idade de avaliação, médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade de erro; Tratamento T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta; AF = antes da fertilização em cobertura. [2/]Apêndice B.
Fonte: (Autor, 2018)

Após a fertilização em cobertura, o DAP das árvores incrementou, em média, 8,0 cm, no entanto, não diferiu em função das fertilizações aplicadas. Já a altura aumentou 11,0 m, em média, depois de 22 meses da aplicação dos tratamentos, e foi maior nas árvores fertilizadas com a recomendação T3. Importante destacar que esta plantação foi formada com mudas seminais, portanto, as variações quanto às características dendrométricas podem ser atribuídas à qualidade genética da progênie (WARING e SCHLESINGER, 1985).

O aumento da altura em plantas de eucalipto pode estar associado ao suprimento adequado de potássio, pois este nutriente está diretamente relacionado às funções de desenvolvimento dos meristemas apicais (EPSTEIN e BLOOM, 2006). Teixeira et al. (2006) observaram que, as maiores dosagens de nutrição potássica promoveram aumento da altura em plantas jovens de *Eucalyptus grandis, Eucalyptus urophylla, Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus urograndis.*

Quanto a influência da fertilização no DAP, Sette Jr. et al. (2010) relataram que as adições de 116 kg ha^{-1} de KCl no pré-plantio e em cobertura, aos seis e aos doze meses de idade das plantas, promoveram incremento de 1,0 cm no DAP, quando comparado às árvores de *Eucalyptus grandis* sem fertilização. Pereira et al. (2012) constataram que em *Eucalyptus urograndis*, quando fertilizado com as doses de 173 g planta^{-1} de N e 340 g planta^{-1} de K, em

cobertura, houve aumento de 21,4% no DAP em relação às dosagens de 57 e 110 g planta^{-1} de N e K, respectivamente.

Apesar do aumento no suprimento de nutrientes no solo, a aplicação de fertilizante em excesso pode não resultar em maiores valores de DAP e altura. Isso foi observado em clones de eucalipto, com 2,8 anos, cultivados em Neossolo, onde os valores de DAP e altura são muito semelhantes aos do presente estudo e, também não houve diferença entre a adubação com 14 ou 724 kg ha^{-1} de N; 14 ou 284 kg ha^{-1} de P; e 109 ou 669 kg ha^{-1} de K. Os reflexos nas variáveis dendrométricas só se manifestaram quando não houve fertilização, onde o DAP e altura das árvores foram menores (STAPE et al., 2010)

Os autores supracitados verificaram ainda que a irrigação foi determinante para o aumento da produtividade, tendo mais influência sobre o crescimento quando comparada ao manejo da fertilização em eucalipto. Isto pode ter ocorrido pois, distintas recomendações de adubação podem não promover grandes efeitos nas variáveis dendrométricas, em função das baixas exigências de fertilidade do solo requeridas pelas plantas de eucalipto (PEREIRA et al., 2012). Cabe ressaltar que durante o período de avaliação do presente estudo, não houve déficit hídrico e as chuvas foram bem distribuídas ao longo dos meses, sendo que, o crescimento registrado nos primeiros anos após o plantio está dentro do observado para a espécie (CORRÊA, 2011; BERGER et al., 2002; DIAS et al., 2014).

Após 36 meses do plantio, atingiram-se as produtividades de 36, 41 e 37 m³ ha^{-1} ano^{-1} para T1, T2 e T3, respectivamente. Estes resultados estão dentro dos valores esperados, considerando os níveis de fertilidade do solo (Tabela 4), de acordo com as projeções de Novais et al. (1986). O maior volume por área (m³ ha^{-1}) em T2 ocorreu em virtude do maior número de árvores por parcela nesse tratamento, no entanto, o volume individual (m³ árv.$^{-1}$) obtido com a recomendação T3 foi 14,8% superior ao observado em T1.

Ao se comparar o cultivo de *Eucalyptus dunnii* em condições de sítio e clima semelhantes, pode-se observar o efeito das diferentes recomendações de fertilização sobre a produtividade. No presente estudo, o volume produzido pelas árvores, aos 36 meses de idade, foi maior do que o observado para a espécie, aos 60 meses, onde a produtividade foi de 24,8 m³ ha^{-1} ano^{-1} (DICK et al., 2016e). Esta plantação (1143 árv. ha^{-1}) também foi cultivada em solo distrófico na região da campanha do bioma Pampa, no entanto, foram aplicados menores níveis fertilização (300 kg ha^{-1} de N-P_2O_5-K_2O 06-30-06 pré-plantio; cobertura de 140 kg ha^{-1} de N-P_2O_5-K_2O 22-05-20 aos 90 dias e 22-00-18 aos 270 dias).

Estudos já evidenciaram o aumento no volume dos troncos de eucalipto em função da fertilização em cobertura, utilizando maiores recomendações de N e K. Para a espécie

Eucalyptus urophylla, quando aplicado 154 kg ha^{-1} de N (sulfato de amônio), o volume foi de 95,2 m^3 ha^{-1} aos 30 meses após o plantio, sendo este resultado 58,1% superior à produção sem adubação nitrogenada, no entanto, o aumento desta dose não implicou em maior produtividade (JESUS et al., 2012). Já para a rebrota de *Eucalyptus grandis*, com fertilização de 120 kg ha^{-1} de K, o volume passou de 87,0 m^3 ha^{-1} para 135,5 m^3 ha^{-1}, incremento que corresponde ao aumento de 54% no volume das árvores na segunda rotação, em comparação à testemunha (FARIA et al., 2002).

A adição de 47 kg ha^{-1} de P_2O_5 na fase de pré-plantio neste estudo também pode estar influenciando a produtividade das árvores, pois respostas à fertilização fosfatada foram expressivas em plantas jovens de *Eucalyptus dunnii*, onde o volume das árvores, aos 11 meses após o plantio, passou de 2,6 m^3 ha^{-1} (testemunha) para 6,6 m^3 ha^{-1} após a aplicação de 300 kg ha^{-1} de P_2O_5 (superfosfato triplo). Nesta mesma dosagem e idade, para o *Eucalyptus benthamii* a produtividade foi de 12,7 m^3 ha^{-1} e, quando não fertilizado, o volume era de 2,6 m^3 ha^{-1} (DIAS et al., 2014). Tanto quanto para o nitrogênio, a fertilização com maiores quantidades de fósforo nem sempre resulta em maior produtividade, por exemplo, para *Eucalyptus camaldulensis*, quando aplicado 96 kg ha^{-1} de P_2O_5 em sulco, o volume produzido foi de 174 m^3 ha^{-1}, em contrapartida com a dose de 54 kg ha^{-1} houve produção de 195 m^3 ha^{-1} (FERNANDEZ et al., 2000).

Cada espécie pode responder à fertilização de forma diferenciada e, além da dosagem, é importante destacar a influência e eficiência das fontes de fósforo, mais ou menos solúveis. As respostas sobre a produtividade podem ser mais pronunciadas em função da fertilização com fosfatos solúveis, ao passo que, a adubação de pré-plantio, seja com 400 ou 800 kg ha^{-1} de fosfato natural, não mostrou efeito significativo sobre *Eucalyptus saligna*, pois três anos após o plantio, independetemente da quantidade de P, o volume individual foi de 0,100 m^3 $árv^{-1}$ (BERGER et al., 2002).

Além da influência das fontes dos minerais, espécies, condições edáficas, dentre outras variáveis, o efeito da adubação sobre a produtividade é mais pronunciado quando a plantação é jovem, portanto haverá eficiência da fertilização em cobertura até a fase de fechamento de copas das árvores de eucalipto (SANTANA et al., 2014). Isso pode ser observado em plantação de *Eucalyptus grandis*, onde aos dois anos do plantio, o volume passou de 26 m^3 ha^{-1} ano^{-1} (testemunha) para 42 m^3 ha^{-1} ano^{-1} após a fertilização de cobertura com 160, 64 e 210 kg ha^{-1} de N, P e K, respectivamente, no entanto, estas diferenças entre os tratamentos reduziram com o aumento da idade das árvores (SILVA et al., 2013).

7.4.2 Produção de biomassa e alocação de carbono

A produção de biomassa da plantação de *Eucalyptus dunnii* não variou em função das diferentes recomendações de fertilizante mineral em cobertura e, a prioridade de alocação seguiu a tendência de madeira do tronco > galhos > casca do tronco > folhas, em todos os tratamentos (Tabela 7). Esta distribuição dos componentes, caracterizada pela maior proporção de galhos em detrimento à casca do tronco, é comumente observada nas plantações jovens de eucalipto (VIERA et al., 2017; SALVADOR et al., 2016; SILVA et al., 2013). Em contrapartida, à medida em que ocorre o crescimento das árvores, há desrama natural e aumento na quantidade de casca do tronco, onde registros apontaram produção de 29,0 e 18,9 Mg ha^{-1} em plantações com 9 e 10 anos, respectivamente (HERNÁNDEZ et al., 2009; VIERA et al., 2013a).

Tabela 7 – Estoque de carbono e biomassa nos componentes das árvores de *Eucalyptus dunnii* em diferentes recomendações de fertilização em cobertura

	T1			**T2**			**T3**		
	C	Biomassa	Ac	C	Biomassa	Ac	C	Biomassa	Ac
Comp	-------Mg ha^{-1}-------		%	-------Mg ha^{-1}-------		%	-------Mg ha^{-1}-------		%
\1F	n.s.2,7 (2,0)	5,3 (24,4)	9,4	2,6 (3,5)	5,1 (3,4)	8,5	2,8 (2,0)	5,3 (13,0)	8,8
G	3,1 (1,1)	6,7 (29,2)	11,9	4,3 (2,0)	9,2 (36,8)	15,3	3,2 (0,8)	7,1 (18,3)	11,8
Ct	1,8 (0,8)	4,2 (53,7)	7,5	2,5 (1,4)	5,7 (10,7)	9,5	2,7 (0,9)	6,5 (7,7)	10,8
Mt	18,1 (0,6)	39,9 (8,7)	71,2	18,2 (1,0)	40,0 (2,0)	66,7	18,8 (0,5)	41,3 (13,0)	68,6
Total	**25,7**	**56,1**	**100**	**27,6**	**60,0**	**100**	**27,5**	**60,2**	**100**

Onde: \1F = folhas; G = galhos; Ct = casca do tronco; Mt = madeira do tronco; C = carbono; Ac = biomassa relativa acumulada em cada componente; valores entre parênteses = coeficiente de variação; n.s. (não significativo) = Todas as médias de alocação de carbono e produção de biomassa entre tratamentos não diferem significativamente pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade de erro; T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta.
Fonte: (Autor, 2018)

O estoque de carbono também não diferiu entre os tratamentos e o acúmulo seguiu a tendência decrescente de madeira do tronco > galhos > folhas > casca do tronco. Apesar da maior quantidade de C estar alocada na madeira do tronco, a maior concentração ocorre nas folhas (51%) e nos galhos (46%), ao passo que, 43% da matéria seca da casca do tronco e 45% da madeira do tronco é composta por C. Em *Eucalyptus globulus*, Lopes e Aranha (2006) também constataram que o componente foliar demanda da maior concentração de C, sendo que,

a quantidade média de carbono, por quilograma de matéria seca, na biomassa da madeira do tronco foi de 40,4%, ao passo que, para folhas e galhos esta relação é de 49,7% e 49,1%, respectivamente.

Em plantações de *Eucalyptus* sp. com a mesma idade das árvores avaliadas no presente estudo, mas cultivadas em Minas Gerais, os valores médios de produção de biomassa foram de 49,12 Mg ha^{-1} e para estoque de C também houve tendência de maior acúmulo em madeira do tronco (9,89 Mg ha^{-1}), seguida de galhos (2,5 Mg ha^{-1}), folhas (1,93 Mg ha^{-1}) e casca do tronco (1,42 Mg ha^{-1}) (GATTO et al., 2011). Também em Minas Gerais, nas árvores de *Eucalyptus urograndis* com cinco anos de idade, o acúmulo de C na madeira do tronco, que possuía DAP médio de 14,2 cm, foi de 14,2 Mg ha^{-1} (TURGUILHO et al., 2010).

Além da idade da árvore e localização do sítio, a quantidade de carbono alocada na biomassa pode variar em função do material genético. Aos dois anos após o plantio, o carbono na biomassa total em *Eucalyptus grandis* foi 226% superior ao observado em *Corymbia citriodora* (ASSIS et al., 2015). Sobre o efeito da fertilização no acúmulo de carbono, Stape et al. (2008) verificaram que, tanto quanto no presente estudo, a adição de maiores quantidades de minerais não implicou em maior produção de biomassa, consequentemente, não houve influência na alocação de carbono em plantas jovens de *Eucalyptus urograndis*, quando cultivadas em Latossolo.

Pode-se considerar que a biomassa produzida aos 36 meses das árvores de *Eucalyptus dunnii* foi satisfatória e expressiva, pois para a mesma espécie em condições edafoclimáticas semelhantes, no entanto após 60 meses de idade e cultivo com menores adições de fertilizante, a alocação total foi de 58,7 Mg ha^{-1} e 69,5% corresponderam à madeira do tronco (DICK et al., 2016e). Outro estudo sobre a espécie, também cultivada nas mesmas condições no bioma Pampa, mas com maior intensidade de fertilização (pré-plantio 300 kg ha^{-1} de fosfato natural reativo; cobertura 110 g $planta^{-1}$ de N-P_2O_5-K_2O 06-30-06; 122 g $planta^{-1}$ de 20-05-20 e 122 g $planta^{-1}$ de 22-00-18), aos 48 meses de idade das árvores, a produção de biomassa total foi de 104,5 Mg ha^{-1} e 76,8 Mg ha^{-1} de madeira do tronco (GUIMARÃES et al., 2015).

Em relação a produção de madeira do tronco, componente principal a ser explorado economicamente, assim como no presente estudo, Stape et al. (2010) também registraram 43,7 Mg ha^{-1} em plantação de eucalipto clonal com 2,8 anos e, independentemente da quantidade de fertilizante (14 ou 724 kg ha^{-1} de N; 14 ou 284 kg ha^{-1} de P; e 109 ou 669 kg ha^{-1} de K), não houve aumento na alocação de biomassa. Os autores ainda observaram este mesmo efeito para plantações clonais com idades distintas, em sítios variados, submetidos a várias intensidades de fertilização e irrigação. Puderam concluir neste estudo que, a obtenção de maior biomassa pode

não estar relacionada ao fornecimento exacerbado de nutrientes, mas sim à adequada disponibilidade hídrica.

Em contrapartida, aumentar a recomendação de fertilizante condicionou maior produção de biomassa em *Eucalyptus grandis*, aos dois anos após o plantio em solo arenoso (SILVA et al., 2013). Com a adição de 40, 16 e 53 kg ha^{-1} de N, P e K, respectivamente, os autores registraram menor produção de folhas (6,6 Mg ha^{-1}), galhos (7,1 Mg ha^{-1}) e madeira do tronco com casca (26,7 Mg ha^{-1}) quando comparado à fertilização com 160, 64 e 210 kg ha^{-1} de N, P e K, respectivamente (folhas = 7,5 Mg ha^{-1}; galhos = 8,1 Mg ha^{-1}; madeira do tronco com casca = 31,5 Mg ha^{-1}).

A fertilização mineral também promoveu aumento significativo na produção de biomassa da madeira do tronco em *Eucalyptus saligna*, após três anos de cultivo na Austrália. A aplicação parcelada de 1.536 kg ha^{-1} de N e 461 kg ha^{-1} de P, resultou no acúmulo de 41,4 Mg ha^{-1} de madeira, em contrapartida, nas árvores não fertilizadas, a produção foi de 6,9 Mg ha^{-1}. Este resultado após a fertilização, considerado acima da média para plantações jovens naquele sítio, foi atribuído ao adequado suprimento de nutrientes no solo, aliado à manutenção de expressiva área foliar (IAF 4,5), especialmente na fase de fechamento de copas (CROMER et al., 1993).

Quando comparada às plantações não fertilizadas, reflexos na produção de biomassa foram observados em *Eucalyptus urophylla* com 30 meses, onde a aplicação de 100 kg ha^{-1} de N (sulfato de amônio) em cobertura, promoveu maior acúmulo de biomassa de folhas e galhos (JESUS et al., 2012). A maior recomendação de adubação de cobertura (19:00:19 na quantia de 173 g $planta^{-1}$ e 340 g $planta^{-1}$ de 18:00:18) também condicionou maior biomassa de folhas e madeira do tronco em *Eucalyptus urograndis*, desde que seja controlada totalmente a mato-competição (PEREIRA et al., 2012). Já a aplicação de 400 kg ha^{-1} de P_2O_5 (na forma de superfosfato simples) proporcionou aumento de 132% na produção de biomassa da madeira do tronco em relação às árvores de *Eucalyptus camaldulensis* não fertilizadas (FERNANDEZ et al., 2000).

Cabe ressaltar que, além da fertilização, as variações quanto a produção de biomassa também estão associadas às espécies, por exemplo, em plantações conduzidas em sítios com as mesmas condições, *Eucalyptus saligna* produziu mais biomassa total e da madeira do tronco quando comparado ao *Eucalyptus urograndis*, aos 18 meses após o plantio (VIERA et al., 2017). Também houve maior biomassa produzida em *Eucalyptus grandis* (52,2 Mg ha^{-1}) quando comparada às plantações de *Eucalyptus pilularis* (35,1 Mg ha^{-1}), após cinco anos de plantio conduzidos em solos férteis na Nova Zelândia (TURNER e LAMBERT, 2008).

A produção de biomassa pode ser maior em plantações fertilizadas quando comparada àquelas sem adição de nutrientes no pré-plantio e cobertura (STAPE et al., 2008; 2010; SILVA et al., 2013), no entanto, observou-se no presente estudo e em outras pesquisas que, recomendar maiores adições de nutrientes não implica, necessariamente, em aumento na alocação da biomassa. Isso ocorre em função da variabilidade de respostas e fatores que influenciam a produção de biomassa, tanto ambientais quanto intrínsecos às espécies de eucalipto. Portanto, ainda são necessários estudos para melhor determinar as recomendações e o número de aplicações de fertilizantes exigidas, pois estas variam e dependem das propriedades do solo, do clima e do melhoramento genético (SILVA et al., 2013).

7.4.3 Concentrações de macronutrientes nos componentes das árvores

As concentrações de macronutrientes variaram entre os componentes da biomassa, mas não diferiram em função da aplicação de diferentes recomendações de fertilizante. Exceto para o cálcio, houve maior concentração de nutrientes nas folhas em T2 e T3 e os menores valores foram constatados na madeira do tronco, em todos os tratamentos (Tabela 8).

Em plantações de diferentes espécies de eucalipto, em idades distintas e cultivadas nos mais variados sítios, com exceção do cálcio, os demais nutrientes também estiveram mais concentrados nas folhas (VIERA et al., 2013a; 2017; GUIMARÃES et al., 2015; SALVADOR et al., 2016; LACLAU et al., 2000). Esta tendência ocorre devido a mobilidade dos nutrientes e em função da maior demanda e atividade metabólica no componente foliar da árvore, que são os locais onde se realizam processos responsáveis pela fotossíntese e pela transpiração (TAIZ e ZEIGER, 2013).

Apesar da fertilização ter promovido melhorias no solo, especialmente nos estoques de K (Estudo 1), as implicações na produção de biomassa e alocação de nutrientes podem não ser evidenciadas em função da heterogeneidade do material vegetal, condicionada pela variabilidade genética das mudas seminais, utilizadas na formação do povoamento de *Eucalyptus dunnii*. A medida em que ocorre o crescimento da planta, os efeitos da fertilização também podem ser amenizados em virtude da diluição de nutrientes e acúmulo de carboidratos e celulose, que são processos decorrentes da maturação foliar (WARING e SCHLESINGER, 1985).

Tabela 8 - Concentrações de macronutrientes nos componentes das árvores de *Eucalyptus dunnii* em diferentes recomendações de fertilização em cobertura

		N	P	K	Ca	Mg	S
		(g kg^{-1})					
T1	[1/]F	[2/]18,40 aA	1,51 aA	7,00 aA	9,51 aA	2,65 aA	1,02 aA
		(12,14)	(6,61)	(14,39)	(13,11)	(2,76)	(5,51)
	G	3,04 bA	0,30 cA	4,25 bA	11,10 aA	1,46 bA	0,28 bA
		(38,20)	(24,13)	(10,24)	(11,50)	(33,07)	(0,35)
	Ct	3,36 bA	0,54 bA	6,64 aA	12,47 aA	2,82 aA	0,30 bA
		(23,81)	(13,71)	(12,17)	(19,62	(19,82)	(11,47)
	Mt	0,72 cA	0,36 cA	2,12 cA	0,83 bA	0,83 bA	0,19 cA
		(83,86)	(26,20)	(24,83)	(28,34)	(22,53)	(18,93)
T2	F	17,62 aA	1,40 aA	8,74 aA	8,96 bA	2,65 aA	1,03 aA
		(15,35)	(14,28)	(38,81)	(19,43)	(5,51)	(9,95)
	G	3,91 bA	0,41 bcA	5,05 bA	9,32 bA	1,56 bA	0,34 bA
		(41,45)	(22,16)	(37,55)	(17,98)	(8,00)	(7,10)
	Ct	3,19 bA	0,59 bA	7,14 abA	13,96 aA	2,81 aA	0,33 bA
		(43,33)	(18,63)	(10,93)	(23,71)	(19,85)	(14,59)
	Mt	0,96 cA	0,28 cA	1,88 cA	0,79 cA	0,73 cA	0,19 cA
		(67,07)	(33,72)	(13,89)	(12,00)	(27,21)	(12,80)
T3	F	20,40 aA	1,23 aA	7,00 abA	7,51 bA	2,69 abA	1,06 aA
		(7,95)	(3,53)	(2,59)	(8,51)	(1,42)	(6,09)
	G	2,64 bcA	0,31 cA	4,98 bA	11,56 aA	1,91 bA	0,33 bA
		(22,37)	(36,53)	(27,30)	(32,24)	(48,23)	(16,52)
	Ct	3,84 bA	0,56 bA	7,47 aA	13,66 aA	2,81 aA	0,30 bA
		(35,15)	(13,93)	(15,54)	(14,83)	(14,89)	(6,35)
	Mt	0,84 cA	0,28 cA	2,16 cA	0,76 cA	0,88 cA	0,19 cA
		(74,43)	(32,79)	(17,94)	(26,42)	(12,81)	(6,98)

Onde: [\1]F = folhas; G = galhos; Ct = casca do tronco; Mt = madeira do tronco; Valor entre parênteses: Coeficiente de variação; [2/]Médias das concentrações, entre os componentes da biomassa, seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, não diferem estre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; Médias das concentrações dos componentes da biomassa, entre diferentes tratamentos, seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, não diferem estre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta;
Fonte: (Autor, 2018)

Sobre os efeitos da fertilização nas concentrações de nutrientes na biomassa em clones jovens de eucalipto, Silva et al. (2013) relataram que logo após a adição parcelada de maiores recomendações em solo arenoso (120, 48, 158 e 72 g planta^{-1} de N, P, K e Ca, respectivamente), os teores foliares aumentaram em detrimento à menor dosagem (40, 16, 53 e 24 g planta^{-1} de N, P, K e Ca, respectivamente). No entanto, com o passar do tempo, as concentrações foliares de P (2,0 g kg^{-1}), Ca (8,5 g kg^{-1}), Mg (3,5 g kg^{-1}) e S (1,3 g kg^{-1}) não diferiram e se equipararam

entre tratamentos, exceto os teores foliares de N, que oscilaram em função das diferentes recomendações de fertilização (de 20 a 25 g kg^{-1}), aos 24 meses após o plantio.

Em plantações de *Eucalyptus dunnii* no bioma Pampa, Guimarães et al. (2015) e Dick et al. (2016e), aos quatro e cinco anos das árvores respectivamente, constataram teores foliares médios de 17,0 g kg^{-1} de N; 1,0 g kg^{-1} de P; 6,0 g kg^{-1} de K; 2,5 de g kg^{-1} de Mg e 1,15 g kg^{-1} de S. Estas concentrações se assemelham as observadas no presente estudo e em demais espécies, também cultivadas em solos de baixa fertilidade, tais como *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita*, aos seis anos de idade (ZAIA e GAMA-RODRIGUES, 2004), e *Eucalyptus uroglobulus* aos 10 anos (VIERA et al., 2013a). No entanto, teores foliares de N abaixo de 14 g kg^{-1} foram observados em *Eucalyptus urograndis* aos cinco anos após o plantio, em solo distrófico no Distrito Federal (GATTO et al., 2014), o que evidencia a influência do sítio e material genético na dinâmica de concentração e alocação de nutrientes na biomassa.

Muitos são os fatores que condicionam a dinâmica e composição mineral dos componentes da biomassa, desde a fertilidade natural do solo, a espécie, a idade da planta, condições de clima (temperatura, chuva, luz umidade do ar) e também a mobilidade no floema ou remobilização do elemento (MALAVOLTA, 2006; SILVEIRA et al., 2004). Em clones de *Eucalyptus urograndis* a influência do tempo sobre as concentrações foliares de nutrientes foi observada, onde as concentrações de N e de Ca aumentaram com o avanço da idade da árvore, ao passo que, houve menor teor de fósforo e maior desequilíbrio de magnésio (WADT et al., 1999). Cabe ressaltar que, o teor de cálcio nas folhas aumenta à medida em que ocorre o crescimento da planta, em função dos depósitos de pectato de cálcio nas paredes celulares (WARING e SCHLESINGER, 1985).

A dinâmica da alocação de nutrientes na biomassa pode variar em função do crescimento das árvores, pois do primeiro até o quinto ano de cultivo, houve aumento do teor de nitrogênio nas folhas, tendência de redução das concentrações foliares de P, K, Ca, Mg e estabilidade da composição mineral nos galhos e na casca do tronco, em plantações de eucalipto em solo arenoso no Congo (LACLAU et al., 2000). Comportamento nutricional distinto foi evidenciado em *Eucalyptus grandis*, onde 24 meses após o plantio das árvores, os teores foliares de N, P e K reduziram, ao passo que, Ca, Mg e S aumentaram (SILVA et al., 2013).

No presente estudo, as concentrações de N nos componentes das árvores coincidem com os valores observados para a espécie, quando cultivada na região do bioma Pampa (GUIMARÃES et al., 2015; DICK et al., 2016e) e, apesar das recomendações de N, aplicadas nas fertilizações de pré-plantio e cobertura, os efeitos dos tratamentos sobre as concentrações

na biomassa não foram evidenciados. Além da influência do tempo após adubação, maturidade da planta e variabilidade genética, ocorre também que o nitrogênio está sujeito a inúmeras transformações no solo, especialmente de natureza biológica e, somando-se à volatilização e lixiviação após a fertilização, pode haver diminuição significativa do potencial fertilizante e aumento da poluição ambiental (MARQUES, 2005).

Plantas de eucalipto absorvem o nitrogênio do solo tanto na forma nítrica (nitrato) como amoniacal (amônia), onde os diferentes sítios (solos arenosos ou argilosos) condicionam as plantas aos mecanismos diversos de absorção e assimilação (GRESPAN et al., 1998). Em detrimento aos demais nutrientes, os teores foliares de N são maiores, pois este compõe estruturas de aminoácidos, proteínas e ácidos nucléicos, além de possuir elevada mobilidade no floema (MARSCHNER, 1995). É o elemento mais requerido pela planta, ao passo que, a sua deficiência afeta diretamente o crescimento e produtividade (TAIZ e ZEIGER, 2013).

Em relação ao fósforo, a fertilização com 47 kg ha^{-1} de P_2O_5, aplicada somente no pré-plantio, até os 36 meses da plantação pode ser considerada adequada, pois os teores na biomassa foliar estiveram dentro dos valores observados em *Eucalyptus dunnii* cultivado nos solos da região da campanha gaúcha (GUIMARÃES et al., 2015; DICK et al., 2016e). De alta mobilidade e rápida redistribuição pelo floema, o fósforo é indispensável no metabolismo energético da planta, intermediando a fotossíntese e respiração (MALAVOLTA, 2006). A deficiência deste elemento afeta diretamente o desenvolvimento e produção de biomassa pela planta, por meio da redução do crescimento, má formação foliar e caulinar, além do surgimento de manchas necróticas (TAIZ e ZEIGER, 2013).

Há necessidade de atentar-se à recomendação de fertilizante fosfatado, evitando a toxidez na planta, causada pela absorção acima da quantidade necessária. Em estudo com plantas jovens de eucalipto, Rocha et al. (2013) verificaram que ocorreu aumento linear da concentração de P nas folhas, em função da maior quantidade de fertilizante aplicado, confirmando a ausência de um mecanismo que evite o “consumo de luxo” deste nutriente. Pesquisas já evidenciaram a importância do fósforo para a silvicultura de eucalipto, onde os teores foliares de P estiveram positivamente associados ao aumento em altura para o *Eucalyptus saligna* (ZAKIA et al., 1983; SGARBI et al., 2000a) e à produtividade das árvores de *Eucalyptus grandis* (WADT, 2004; SGARBI et al., 2000b; BELLOTE e FERREIRA, 1993).

Quanto ao potássio, este nutriente esteve presente em maiores concentrações nas folhas e galhos da plantação, em todos os tratamentos aplicados. Tanto a fertilização em cobertura com a recomendação de 30 (T1), 45 (T2) ou 90 (T3) g $planta^{-1}$ de K, promoveram teores foliares semelhantes aos observados por Silva et al. (2013), que adicionaram 210 g $planta^{-1}$ de K e a

concentração foi de 8,0 g kg^{-1} em clones de eucalipto aos 24 meses. Também pode-se observar no presente estudo que os teores de K são ligeiramente mais elevados nos componentes folhas, casca da madeira e madeira do tronco, quando comparados aos observados em plantações de *Eucalyptus dunnii*, cultivadas sob condições ecológicas semelhantes (GUIMARÃES et al., 2015; DICK et al., 2016e).

Maiores concentrações de K foram observadas nas folhas e galhos em função da elevada mobilidade deste nutriente, que atua na regulação estomática e ativação de aproximadamente 50 enzimas, sendo o principal íon presente no vacúolo das células e é importante para a manutenção do turgor, sendo também facilmente lixiviado do tecido foliar (PRADO, 2008). Plantas bem nutridas com esse nutriente são mais resistentes a secas e geadas, em razão da maior retenção hídrica (MALAVOLTA, 2006), ao passo que, a fertilização potássica também promove maior eficiência do uso da água em plantações de eucalipto (BATTIE-LACLAU et al., 2016). É o segundo elemento que mais limita a obtenção de altas produtividades na eucaliptocultura brasileira (BARROS et al., 2014).

Diversos estudos evidenciam as respostas à fertilização potássica, por exemplo, na fase de rustificação em *Eucalyptus urograndis,* com a irrigação contendo 2.988 mg L^{-1} de K, a planta acumulou 43,5 g kg^{-1} do nutriente nas folhas, no entanto, os teores foram 55% menores quando não houve fertilização (D'AVILA et al., 2011). Maiores recomendações de K, além de aumentar o teor foliar e matéria seca em *Eucalyptus camaldulensis,* foram importantes para amenizar os efeitos danosos da compactação de Latossolo sobre o fluxo difusivo de K e crescimento radicular (SILVA et al., 2002). Em áreas com rebrota de *Eucalyptus grandis,* o sistema de preparo de solo também influenciou a disponibilidade e teores foliares de potássio, onde a gradagem proporcionou maiores concentrações de K no solo, consequentemente, maiores foram os teores deste nutriente nas folhas (8,2 g kg^{-1}) quando comparado às rebrotas conduzidas em solo não revolvido (7,5 g kg^{-1}) (CAVICHIOLLO et al., 2004).

Em decorrência da baixa disponibilidade no solo e perdas por lixiviação, elementos como N, P e K, são incorporados via fertilização, pois o suprimento adequado destes nutrientes são indispensáveis à produtividade das plantações comerciais (SANTANA et al., 2014; BARROS et al., 2014). Por exemplo, para *Eucalyptus grandis,* a relação entre teor foliar de N e produtividade é quadrática, ou seja, nem sempre maiores concentrações de N condicionam maior volume de madeira. Para esta espécie, a produtividade de 70 m^3 ha^{-1} ano^{-1} foi alcançada quando houve 24,8 g kg^{-1} de N nas folhas. Já os teores foliares de potássio estiveram linear e positivamente associados à produtividade de *Eucalyptus saligna*, onde na concentração de 10,5 g kg^{-1} de K nas folhas, pôde-se atingir o volume de 77 m^3 ha^{-1} ano^{-1} (SILVEIRA et al., 2004).

Também foram constatadas associações positivas entre maiores teores foliares de potássio e aumento em altura para *Eucalyptus saligna* (ZAKIA et al., 1983) e *Eucalyptus grandis* (BELLOTE e FEREIRA, 1993).

Neste estudo as maiores concentrações de cálcio foram constatadas na casca e na madeira do tronco, componentes importantes no ciclo biogeoquímico, por serem drenos de nutrientes e muitas vezes são retirados do sítio pela colheita florestal, podendo comprometer a produtividade futura em solos de baixa fertilidade (SANTANA et al., 2008). Apesar da fertilização com Ca e Mg, oriunda da adição de 2 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico na fase pré-plantio das mudas, para *Eucalyptus dunnii* cultivado em Argissolo na região da campanha do Rio Grande do Sul, foram constatadas maiores concentrações foliares de cálcio e magnésio em comparação ao presente estudo (GUIMARÃES et al., 2015; DICK et al., 2016e). Além da relação com a fertilidade do solo (baixos teores de Ca e Mg – Tabela 4), estas diferenças também podem ter ocorrido em função da idade das árvores, classe de solo, além da influência do número de rotações já conduzidas na área, diretamente relacionada à decomposição de resíduos lenhosos e liberação destes nutrientes, que ocorrem a longo prazo (FARIA et al., 2009).

É importante atentar-se ao suprimento de macronutrientes com baixa mobilidade no floema, tais como enxofre e cálcio, pois estes possuem ciclagem reduzida nas folhas, consequentemente os teores são menores em plantas mais jovens (SGARBI, 2002). O cálcio é um nutriente de baixa mobilidade no floema, atuando como regulador de muitos processos celulares, utilizado na síntese da lamela média, presente principalmente nos elementos lignificados, como a casca, galhos, raízes e em folhas maduras (MARENCO e LOPES, 2009; GUIMARÃES et al., 2015; DICK et al., 2016e; VIERA et al., 2013a; GATTO et al., 2014). Já o magnésio tem papel específico na ativação de enzimas envolvidas na respiração, fotossíntese e síntese de DNA e RNA, fazendo parte da estrutura molecular da clorofila. Diferente do cálcio e enxofre, o magnésio é rapidamente translocado das regiões maduras para as mais jovens da planta (TAIZ e ZEIGER, 2013; EPSTEIN e BLOOM, 2006).

Em plantações de *Eucalyptus grandis,* Bellote e Ferreira (1993) verificaram relação direta entre os teores foliares adequados de cálcio e maior crescimento da espécie. Também é um elemento limitante para o crescimento e, o suprimento de cálcio é necessário, uma vez que, esteve diretamente elencado à maior produtividade de plantas de jovens de *Eucalyptus* sp., *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* (SILVEIRA et al., 2000; SGARBI et al., 2000a). Na silvicultura é imprescindível manejar a fertilização envolvendo o cálcio, em sua maioria realizada através da aplicação de calcário antes do plantio das mudas, pois à medida em que se elevaram os teores foliares de cálcio, houve redução na produtividade (SGARBI et al., 2000b)

e relação negativa com a altura de *Eucalyptus grandis* (ZAKIA et al., 1983). Para esta espécie, Silveira et al. (2004) verificaram que, quando o teor foliar de cálcio é de 5 g kg^{-1}, obteve-se produtividade de 73,5 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, entretanto, aumentando a concentração para 9,3 g kg^{-1} houve produção de apenas 14 m^3 ha^{-1} ano^{-1} de madeira. Zakia et al. (1983) também apontam relação negativa entre maiores teores de magnésio e altura em *Eucalyptus grandis*, o que não foi verificado para *Eucalyptus saligna.*

Não houve adição de enxofre nos tratamentos, no entanto, além da fertilização mineral e reservas do solo, a precipitação pluviométrica é uma importante fonte de S às plantações florestais. Através da água da chuva, mais de 9,0 kg ha^{-1} ano^{-1} de sulfato foram aportados e contribuíram para a nutrição de *Eucalyptus dunnii* na área de estudo, durante o ano de 2015 (DICK e SCHUMACHER, 2017). O enxofre é um nutriente exigido para a formação de aminoácidos e proteínas, envolvido na fotossíntese, condicionando maior resistência ao frio (MALAVOLTA, 2006). Também é considerado um nutriente essencial para garantir altas produtividades e não limitar o crescimento, e junto do magnésio pode ser fornecido como nutriente acompanhante na fertilização (SANTANA et al., 2014).

Neste estudo, esperava-se que as diferentes recomendações de N e K influenciassem a dinâmica da ciclagem bioqúimica, pois dentre os vários fatores que podem afetar as concentrações de nutrientes nos componentes da biomassa, destaca-se a fertilidade do solo, manejada através das adições via fertilização. Este reflexo pode não ser evidenciado pois, nem sempre elevar a quantidade de nutrientes no solo implica em maior concentração na biomassa das plantas, em função de diversos fatores ambientais inerentes ao processo de absorção, tais como complexação, imobilização, lixiviação, volatilização, dentre outros fenômenos de sorção nos solos, que reduzem a disponibilidade dos elementos (SGARBI, 2002).

Também cabe destacar que as respostas às diferentes recomendações de adubação em cobertura podem não ser evidenciadas, em função de possível restrição ao “consumo de luxo” dos nutrientes (TAIZ e ZEIGER, 2013), pois as concentrações foliares de N e K já estavam dentro da faixa adequada após a fertilização de pré-plantio, que pode ter sido suficiente para promover o suprimento nutricional (DICK et al., 2016f).

7.4.4 Concentrações de micronutrientes nos componentes das árvores

As concentrações de micronutrientes também variaram entre os componentes da biomassa, com maiores teores nas folhas e menores na madeira do tronco (exceto para Fe e Cu em T1). Houve diferenças entre os tratamentos, onde B esteve menos concentrado nas folhas

das árvores em T3, os menores teores de Fe foram constatados nos galhos das árvores fertilizadas com a recomendação T3, além de menores concentrações de Mn (T1 e T3) e Zn na casca do tronco (T1) (Tabela 9).

Tabela 9 - Concentrações de micronutrientes nos componentes das árvores de *Eucalyptus dunnii* em diferentes recomendações de fertilização em cobertura

		B	Cu	Fe	Mn	Zn
		(mg kg^{-1})				
T1	[1/]F	[2/]23,73 aA (18,31)	5,71 aA (22,25)	85,28 aA (13,92)	711,82 aA (2,27)	14,84 aA (20,87)
	G	10,80 bA (21,03)	4,11 aA (23,46)	39,75 bA (24,21)	415,61 bA (10,80)	10,46 bA (4,72)
	Ct	14,09 bA (21,15)	2,55 bA (23,87)	28,05 bB (37,64)	677,08 aA (7,87)	8,73 bB (10,39)
	Mt	3,40 cA (21,81)	1,84 bA (33,00)	30,83 bA (83,86)	91,88 cA (38,82)	6,28 cA (34,37)
T2	F	17,36 aAB (16,54)	3,96 aA (25,62)	74,50 aA (11,88)	591,38 abA (28,85)	14,48 aA (3,28)
	G	10,89 bA (20,57)	3,97 aA (28,80)	40,26 bA (24,79)	426,44 bA (36,31)	10,77 bA (12,61)
	Ct	13,61 bA (13,31)	2,96 aA (22,49)	44,97 bA (27,43)	642,81 aA (14,54)	10,73 bA (16,78)
	Mt	3,45 cA (30,23)	1,71 bA (30,64)	33,45 bA (42,92)	86,19 cA (46,64)	6,91 cA (23,46)
T3	F	14,36 aB (12,69)	4,57 aA (16,73)	76,91 aA (20,15)	493,32 aA (15,11)	15,61 aA (3,09)
	G	14,18 aA (18,19)	4,09 aA (18,55)	39,24 bA (24,55)	322,04 bA (22,10)	11,70 bA (15,37)
	Ct	12,51 aA (10,05)	2,70 bA (12,43)	31,16 bAB (41,31)	528,14 aB (17,27)	8,51 cB (8,60)
	Mt	2,89 bA (22,19)	1,80 cA (21,76)	21,62 bA (43,92)	63,74 cA (29,76)	6,01 dA (29,53)

Onde: [1/]F = folhas; G = galhos; Ct = casca do tronco; Mt = madeira do tronco; Valor entre parênteses: Coeficiente de variação; [2/]Médias das concentrações entre os componentes da biomassa, seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, não diferem estre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; Médias das concentrações dos componentes da biomassa, entre diferentes tratamentos, seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, não diferem estre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta.
Fonte: (Autor, 2018)

As diferenças quanto as concentrações entre os tratamentos podem estar atribuídas à diversos fatores, dentre eles, a fertilidade do solo que pode condicionar relações sinérgicas entre

os nutrientes, mobilidade no floema que influencia a dinâmica de transolcação e retranslocação dentro da planta, além de características e variabilidade intrínsecas às árvores, que alteram a ciclagem bioquímica, sendo que, nesta plantação de *Eucalyptus dunnii* não foram adiconados fertilizantes contendo micronutrientes (WARING e SCHLESINGER, 1985; TAIZ e ZEIGER, 2013).

Apesar dos altos teores de B no solo da área de estudo (DICK et al., 2016b), é necessário atentar-se ao suprimento de micronutrientes, pois deficiências de boro e zinco são muito comuns em plantações de eucalipto, principalmente em solos arenosos e com déficit hídrico (JOSÉ et al., 2009; MALAVOLTA, 2006; BARROS et al., 2014). Para o manganês há tendência de acúmulo e aumento dos teores à medida em que a árvore cresce (LEITE et al., 2014), ao passo que, deficiências de ferro são pouco relatadas em plantações florestais.

Os micronutrientes são elementos essenciais, conhecidos como minerais-traço, requeridos em quantidades menores para o desenvolvimento das árvores (GUPTA, 2001), no entanto, recentemente passaram a ser recomendados e utilizados de modo mais rotineiro nas adubações em várias regiões e para as mais diversas condições de solo, clima e culturas (LOPES e ABREU, 2000). Por exemplo, para *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus grandis* cultivados em solos arenosos no Uruguai, Ferrando e Zamalvide (2012) recomendaram aplicar 4 g de B por árvore, para alcançar níveis nutricionais de suficiência foliar sem causar toxidez.

Estudos apontaram a relação inversa entre as concentrações foliares de boro e produtividade de *Eucalyptus grandis*, em função da baixa mobilidade deste elemento no floema, o que acaba reduzindo a ciclagem das folhas mais velhas para as mais novas (BELLOTE e FERREIRA, 1993). Para *Eucalyptus grandis*, Sgarbi et al. (2000b) relataram que maiores teores de boro promoveram maior produtividade, ao passo que, Silveira et al. (2004) afirmam que para *Eucalyptus saligna*, os maiores teores foliares não implicam em maior produtividade, onde volumes expressivos foram obtidos quando houve 43 mg kg^{-1} de B nas folhas. Já em estudo com *Corymbia citriodora*, maiores teores foliares, bem como maiores recomendações de fertilização de boro em Latossolo (6,25 mg kg^{-1}), não resultaram na maior produção de matéria seca de raízes e parte aérea (RAMOS et al., 2009).

A deficiência de boro é mais comum em solos arenosos (MARENCO e LOPES, 2009) e tem sido relatada em várias espécies de eucalipto, entretanto, a adição desse nutriente via fertilização pode promover melhorias significativas na produção e qualidade da madeira (FERRANDO e ZAMALVIDE, 2012). Atenção especial deve ser destinada a este micronutriente, pois há severidade dos sintomas de deficiência de B, tais como, morte das

gemas apicais ou intensa ramificação pela perda da dominância apical, além de ocorrência de necroses em folhas jovens (TAIZ e ZEIGER, 2013; EPSTEIN e BLOOM, 2006).

Mattiello et al. (2009) avaliaram a resposta de clones de eucalipto às doses de boro e observaram que, sem adição deste elemento manifestaram-se sintomas visuais de deficiência, tais como clorose e encarquilhamento em folhas jovens que se tornam quebradiças, caule com maior rigidez, aspecto de vitrificação e quebra. Os autores constataram ainda que, em altas concentrações de B na solução nutritiva (100 µmol/L), não apareceram sintomas de toxidez, porém a produção de matéria seca reduziu.

As concentrações foliares de boro variam de acordo com a adição deste elemento via fertilização, nível de maturação foliar e com o avanço da idade da árvore, momento em que há aumento no requerimento de B pelas folhas mais novas (FERRANDO e ZAMALVIDE, 2012; RAMOS et al., 2009; MATTIELLO et al., 2009). No presente estudo, as concentrações de B são menores e diferem das observadas em *Eucalyptus dunnii* na região do bioma Pampa, onde os teores foliares foram de 32,2 mg kg^{-1} e 36,1 mg kg^{-1}, aos quatro e cinco anos de idade das plantações, respectivamente (DICK et al., 2017; GUIMARÃES et al., 2015). Esta tendência também foi observada em plantas jovens *Eucalyptus grandis*, onde os teores foliares de B passaram de 24 mg kg^{-1} aos seis meses, para 41 mg kg^{-1} aos doze meses de idade das árvores (FERRANDO e ZAMALVIDE, 2012).

O manganês, mais concentrado nas folhas e na casca do tronco nas árvores de *Eucalyptus dunnii*, é um nutriente essencial à planta, pois participa diretamente no processo de fotossíntese, atuando no complexo de quebra de moléculas de água, utilizadas nas reações luminosas de conversão de luz em energia, que consequentemente liberam oxigênio para a atmosfera (TAIZ e ZEIGER, 2013). Precauções quanto às recomendações corretas de manganês nas práticas de fertilização devem ser adotadas, pois altos teores foliares de manganês estiveram associados à baixa produtividade de eucalipto (SGARBI et al., 2000a; SILVEIRA et al., 2000). O manejo da adubação deste micronutriente é primordial pois sua ausência reduz drasticamente o crescimento (MARENCO e LOPES, 2009), e de acordo com Leite et al. (2014), o excesso pode favorecer o aparecimento de doenças, como a seca dos ponteiros.

Tanto quanto no presente estudo, muitos trabalhos vêm mostrando a tendência do eucalipto em acumular manganês na sua biomassa, especialmente nas folhas e casca do tronco (LEITE et al., 2014), comportamento que também foi constatado por Viera et al. (2013a), Guimarães et al. (2015) e Dick et al. (2017), onde as concentrações foliares de Mn em eucalipto variaram de 400 a 2.000 mg kg^{-1}. O elevado acúmulo de Mn pode ser explicado em função da baixa mobilidade deste micronutriente, considerado um elemento de redistribuição insuficiente,

onde o transporte é feito de forma unidirecional através do xilema e, depois de acumulado nas folhas mais velhas, não é mobilizado, podendo ser removido por lavagem (PRADO, 2008; MALAVOLTA et al., 2006).

Quando comparado à plantação de *Eucalyptus dunnii* aos cinco anos, cultivada na região da campanha do bioma Pampa (DICK et al., 2017), os teores de cobre e ferro obtidos no presente estudo são menores, o que também foi observado por Viera et al. (2017) na biomassa de árvores jovens de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urograndis*. Deficiências destes elementos não são muito recorrente nas plantas, uma vez que o requerimento por estes nutrientes é baixo e problemas com toxidez, especialmente de Cu, são mais preocupantes (MARENCO e LOPES, 2009). O cobre participa das reações redox do processo de fotossíntese e possui baixa mobilidade no floema (TAIZ e ZEIGER, 2013), sendo assim, tanto quanto para o Mn, maiores teores foliares de Cu estão relacionados ao aumento da idade das árvores (GUIMARÃES et al., 2015; DICK et al., 2017).

Assim como o boro e cobre, o zinco também é um nutriente comumente aplicado como acompanhante na fertilização de pré-plantio e de cobertura, no entanto, não foi adicionado nesta plantação de *Eucalyptus dunnii*. O Zn é requerido na ativação de enzimas (desidrogenase, RNA, DNA polimerases) e sua deficiência interfere negativamente no metabolismo de carboidratos e na síntese de proteínas, reduzindo o florescimento e frutificação (EPSTEIN e BLOOM, 2006). Também propenso a causar toxidez em função da fertilização com recomendações elevadas, os altos teores foliares de zinco podem levar à baixa produtividade de eucalipto (SGARBI et al., 2000b).

Cuidados nas recomendações de fertilizantes contendo micronutrientes são fundamentais, uma vez que, pode-se facilmente induzir à toxidez quando aplicados em excesso (TAIZ e ZEIGER, 2013). Recomenda-se a aplicação na forma de nutrientes acompanhantes no momento da fertilização pré-plantio ou até mesmo em cobertura (BARROS et al., 2014). Por exemplo, para o boro é necessário um fornecimento constante para atender as demandas do eucalipto, em função da baixa translocação dentro da planta, além de ser um nutriente pouco retido pelo solo, ainda fica sujeito a perdas por lixiviação (FERRANDO e ZAMALVIDE, 2012).

A partir dos quatorze meses de idade da plantação de *Eucalyptus dunnii*, que é uma das fases mais importantes do crescimento, pois compreende o fechamento das copas, a área foliar tende para o máximo e a demanda nutricional é muito elevada, sendo que, déficit de nutrientes e/ou água neste período podem comprometer a produtividade futura (SANTANA et al., 2014). Cabe destacar que não foram observados sintomas visuais de deficiência de nutrientes na

plantação, e de forma geral, independentemente da recomendação de fertilizante, as concentrações contidas nos componentes das árvores foram adequadas para o alcance da produtividade (Tabela 6) e biomassa produzida (Tabela 7), que podem ser consideradas satisfatórias para a idade das plantas e sítio.

Estudos sobre a ciclagem sempre evidenciam que os teores de nutrientes presentes na biomassa da planta diferem entre e dentro dos componentes da biomassa, em função da ciclagem bioquímica, que desloca nutrientes dos tecidos mais velhos para os locais com maior atividade metabólica (PALLARDY, 2008). Ressalta-se que conhecer a distribuição dos nutrientes nos componentes das árvores tem grande importância na nutrição de plantações florestais conduzidas em rotações sucessivas, pois o manejo intensivo pode aumentar a produção de biomassa, mas também pode intensificar a remoção de nutrientes (VIERA et al., 2013a).

7.4.5 Estoques de nutrientes nos componentes das árvores

Para o estoque de nutrientes (Tabela 10), exceto N e Ca, apesar das menores concentrações, as maiores quantidades estão acumuladas na madeira do tronco, em todos os tratamentos, o que ocorre em virtude da maior biomassa produzida neste componente. A tendência de estoque de nutrientes, considerando a quantidade presente na biomassa total, seguiu a ordem decrescente: Ca > K > N >Mg > P > S > Mn > Fe > B > Zn > Cu. De todos os elementos, houve maior estoque de K na madeira do tronco, cujo acúmulo correspondeu a 47%, 36% e 42% da quantidade total de nutrientes em T1, T2 e T3, respectivamente.

Nas folhas, onde houve a menor quantidade de biomassa alocada, o estoque de nitrogênio foi superior aos demais componentes, pois a demanda foliar por este nutriente é maior, em função das exigências para o funcionamento do aparato fotossintético, composição e ativação de enzimas, em consequência, este é o elemento mais expressivo e indispensável nas práticas de fertilização em plantações comerciais de eucalipto (PRADO, 2008).

Buscando a redução de exportações elevadas de N e Ca, é importante manter os resíduos da colheita da biomassa (folhas, galhos e casca do tronco) no sítio pois, maiores estoques de Ca foram encontrados nos galhos e na casca do tronco, componentes estes que contribuíram com mais de 20% da biomassa produzida na plantação de *Eucalyptus dunnii.*

Tabela 10 - Estoque de nutrientes nos componentes da biomassa nas árvores de *Eucalyptus dunnii* em diferentes recomendações de fertilização em cobertura

		N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		(kg ha^{-1})						(g ha^{-1})				
T1	[1]/F	97,5	8,0	37,1	50,4	14,1	5,4	125,8	30,3	452,0	3772,6	78,8
	G	20,4	2,0	28,5	74,4	9,8	1,9	72,4	27,6	266,3	2784,6	70,1
	Ct	14,1	2,2	27,9	52,4	11,9	1,3	59,2	10,7	117,8	2843,7	36,7
	Mt	28,7	14,3	84,4	33,2	33,8	7,8	135,7	73,5	1230,3	3666,1	249,6
	Total	160,7	26,6	177,9	210,4	69,5	16,3	393,0	142,1	2066,5	13067,1	435,1
T2	F	87,8	7,1	44,6	45,7	13,5	5,3	88,5	20,0	379,9	3016,0	73,8
	G	36,0	3,8	46,5	85,7	14,4	3,2	100,2	36,5	370,4	3923,2	99,1
	Ct	18,2	3,3	40,7	79,6	16,0	1,9	77,6	16,9	256,3	3664,0	61,2
	Mt	38,4	11,2	75,2	31,6	29,4	7,5	137,9	68,5	1338,0	3447,8	276,2
	Total	180,3	25,5	207,0	242,6	73,3	17,8	404,1	141,9	2344,6	14051,0	510,3
T3	F	108,1	6,5	37,1	39,8	14,3	5,6	76,1	24,2	407,6	2614,6	82,7
	G	18,7	2,2	35,4	82,1	13,6	2,3	100,7	29,1	278,6	2286,5	83,1
	Ct	25,0	3,7	48,5	88,8	18,3	1,9	81,3	17,5	202,5	3432,9	55,3
	Mt	34,7	11,7	89,2	31,3	36,5	7,7	119,3	74,4	892,8	2632,3	248,0
	Total	186,5	24,1	210,2	241,9	82,6	17,6	377,4	145,2	1781,6	10966,3	469,1

Onde: [1]F = folhas; G = galhos; Ct = casca do tronco; Mt = madeira do tronco; T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta.
Fonte: (Autor, 2018)

As diferentes recomendações de fertilização não influenciaram a produção de biomassa da plantação de *Eucalyptus dunnii* (Tabela 7), no entanto, exceto para o P, os estoques de macronutrientes nas árvores que receberam o T1 são menores em relação à T2 e T3. Para T2 e T3, os estoques totais de N, P e K estão acima dos valores encontrados para *Eucalyptus dunnii* aos cinco anos de idade (175,5; 18,2 e 170,1 kg ha^{-1} de N, P e K, respectivamente), cultivado em solo distrófico na região da campanha do bioma Pampa, onde a magnitude de acúmulo dos nutrientes na biomassa total seguiu a tendência Ca > N > K > Mg > S > P (DICK et al., 2016e).

A fertilização pode influenciar o estoque de nutrientes na biomassa, pois aos quatro anos das árvores de *Eucalyptus dunnii* fertilizadas com 300 kg ha^{-1} de fosfato natural reativo no pré-plantio e três fertilizações pós-plantio com N-P_2O_5-K_2O 06-30-06 (110 g planta^{-1}), 20-05-20 (122 g planta^{-1}) e 22-00-18 (122 g planta^{-1}), Guimarães et al. (2015) encontraram tendência de estoque semelhante ao presente estudo, onde os maiores acúmulos de Ca também foram observados na casca do tronco e galhos, bem como, maiores quantidades de K na madeira do tronco (98,7 kg ha^{-1}). Em contrapartida, Gatto et al. (2014) constataram estoque de apenas 19,28

kg ha^{-1} de K na madeira do tronco, em clones de *Eucalyptus urograndis* com 5 anos de idade, cultivados no Distrito Federal e fertilizados com 500 kg ha^{-1} de superfosfato simples e 280 g $planta^{-1}$ de N-P_2O_5-K_2O 20:05:20.

Cabe ressaltar que o estoque de nutrientes na biomassa também pode ser influenciado pela espécie de eucalipto e pela idade das árvores. Há tendência de maior acúmulo de nutrientes à medida em que aumenta a produção de biomassa, o que ocorreu em *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus pilularis*, em média, ao sétimo ano das plantações, idade recomendada para o corte das árvores e término da rotação (TURNER e LAMBERT, 2008).

Quanto aos micronutrientes, o estoque de Mn é variável entre os componentes e entre os tratamentos, no entanto, Guimarães et al. (2015) constataram maiores quantidades deste elemento na casca do tronco e Dick et al. (2017) nos galhos em árvores de *Eucalyptus dunnii* com 4 e 5 anos, respectivamente. Os demais micronutrientes estão estocados em maiores quantidades da madeira do tronco, no entanto, em relação aos estudos supracitados, estes valores são expressivamente menores, pois na madeira do tronco de árvores em idades mais jovens, a imobilização de nutrientes é menor (CUNHA et al., 2005).

7.5 CONCLUSÕES

Até os 36 meses da plantação de *Eucalyptus dunnii*, a aplicação da fertilização padrão + 200% da mesma dose (T3), em cobertura, promoveu maior altura das árvores e, em função desta variável houve aumento no volume por árvore, em comparação ao T1, no entanto, o DAP não variou entre tratamentos.

As diferentes recomendações de fertilização mineral não promoveram efeitos significativos sobre a produção de biomassa e acúmulo de carbono. Esperava-se que as recomendações de N e K influenciassem a dinâmica da ciclagem bioqúimica, no entanto, nem sempre elevar a quantidade de nutrientes no solo implica em maior concentração na biomassa das plantas. Os efeitos das maiores recomendações de fertilizante em cobertura podem não ter sido evidenciados, pois as concentrações foliares de N e K já estavam dentro da faixa adequada após a fertilização de pré-plantio.

A produtividade e produção de biomassa obtidas neste sítio foram satisfatórias e a fertilização padrão (T1 = 150 g $planta^{-1}$ de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24), em cobertura, pode ser recomendada para a condução de plantações de *Eucalyptus dunnii* em Cambissolo, na região da campanha central do bioma Pampa.

8 ESTUDO 3 – CICLAGEM GEOQUÍMICA DOS NUTRIENTES E IMPLICAÇÕES NO BALANÇO NUTRICIONAL

Resumo: O objetivo do presente estudo foi avaliar a entrada de nutrientes via precipitação pluviométrica incidente (Pt), além de estimar o balanço nutricional (BN) em plantação de *Eucalyptus dunnii*, após aplicação de diferentes recomendações de fertilização (T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta, respectivamente), em cobertura. Determinaram-se concentrações de nutrientes (N, S-SO_4^{2-}, K^+, Ca^{2+} e Mg^{2+}) da solução aquosa da Pt e com base no volume de água, estimou-se a quantidade (kg ha^{-1}) para cada elemento. Para BN foram consideradas as entradas via Pt somadas às adições via fertilização (F), e saídas pelo acúmulo de nutrientes na biomassa da madeira do tronco (Bm). Quantidades expressivas de nutrientes foram incorporadas via precipitação pluviométrica, cuja sequência de aporte foi K > S > Ca > N > Mg. Estas entradas poderiam reduzir a adição de 22% e 11% das quantidades de K e N, respectivamente, aplicadas na fertilização pré-plantio. Em relação ao BN, considerando o cenário de remoção da madeira do tronco aos 36 meses da plantação de *Eucalyptus dunnii*, este é positivo para os nutrientes N, P e K e negativo para Ca, Mg e S, em todos os tratamentos. Apesar das entradas via precipitação pluviométrica, há necessidade de reposição de Ca, Mg e S para a manutenção da sustentabilidade nutricional, ao passo que, a dose T1 foi suficiente para promover o BN positivo, no entanto, as maiores recomendações de N e K adicionadas via fertilização mineral em cobertura (T2 e T3), implicaram em aumento no suprimento nutricional, o que pode ser fundamental à longo prazo. Importante salientar que esta simulação se aplica ao corte das árvores com 36 meses, ao passo que, em rotação mais longas, a dinâmica de acúmulo de biomassa e alocação de nutrientes tende a aumentar com o avanço da rotação, consequentemente, o balanço será alterado pois as remoções através da colheita da madeira do tronco serão maiores.

Palavras-chave: Hidrologia florestal; Nutrição florestal; Sustentabilidade florestal.

8.1 INTRODUÇÃO

A produtividade das plantações florestais é influenciada pelo suprimento de minerais dissolvidos na água e incorporados pela deposição atmosférica via úmida e seca, sendo que, a quantidade de nutrientes, advindos da precipitação, também é importante para a manutenção da

capacidade produtiva dos solos onde se pratica a silvicultura do eucalipto (SCHUMACHER e VIERA, 2015). O enriquecimento de nutrientes na precipitação pluviométrica incidente em plantações é oriundo de aerossóis e partículas em suspensão na atmosfera, que posteriormente são depositados nas superfícies das plantas (WALLING, 1980). Estes fluxos de nutrientes podem complementar a fertilização mineral, ou até mesmo serem suficientes para garantir a produtividade florestal, compreendendo assim uma importante etapa da ciclagem geoquímica (ASHAGRIE e ZECH, 2010).

O grau de modificação da qualidade da precipitação incidente varia de lugar para lugar e de acordo com as espécies arbóreas. Varia ainda através do tempo, em resposta às flutuações na qualidade da precipitação, variações na disponibilidade de aerossóis e exsudados da vegetação e intensidade das precipitações (WALLING, 1980). O contato da precipitação pluviométrica com as copas das árvores também influencia a quantidade e composição química da solução aquosa (CARNOL e BAZGIR, 2013). Isso ocorre pois o dossel atua no retorno de nutrientes para o solo, através da interceptação da deposição atmosférica, promovendo a redistribuição da precipitação, alterando o pH e as concentrações de íons, além de lavar os depósitos secos sob o folhedo e lixiviar elementos dos tecidos vegetais (SHEN et al., 2013).

A cobertura vegetal nos maciços florestais possui uma função de destaque no balanço hídrico e, a entrada de água e nutrientes também é influenciada pelo tipo de vegetação (DINIZ et al., 2013). Em uma plantação de eucalipto, os vários caminhos que a água poderá seguir, após uma dada precipitação, podem ser subdivididos em interceptação, evaporação das superfícies úmidas, transpiração das plantas, evaporação do solo e o derrame da bacia hidrográfica, através de algum canal ou rio que a mesma possuir (SCHUMACHER e VIERA, 2015). A concentração dos nutrientes na precipitação incidente é aumentada após o seu contato com as copas das árvores e este padrão foi verificado em povoamentos de *Eucalyptus dunnii* (CORRÊA, 2011), *Eucalyptus grandis* (LACLAU et al., 2010a), *Eucalyptus* sp. (LACLAU et al., 2003), *Eucalyptus globulus* (ASHAGRIE e ZECH, 2010), dentre outros trabalhos.

Em um cenário onde a silvicultura está se desenvolvendo em novas fronteiras, especialmente em áreas degradadas e de baixo potencial produtivo, a avaliação e entendimento de uma das mais importantes vias de entrada de nutrientes, a precipitação pluviomátrica, subsidiará o eficiente manejo da fertilização. Aliada a estas informações, considerar o balanço nutricional, computando as entradas e saídas de nutrientes através da colheita da biomassa, é imprescindível para a manutenção da qualidade do sítio, pois um balanço positivo indica que os plantios de eucalipto, quando corretamente manejados, não exaurem o solo, podendo sim beneficiá-lo (GATTO et al., 2014).

Este balanço entre as saídas e entradas, que no conjunto define a chamada ciclagem biogeoquímica, constitui um dos indicadores mais importantes no que diz respeito à sustentabilidade, pois está relacionado com a manutenção do potencial produtivo do solo ao longo das sucessivas rotações (LIMA et al., 2002). O objetivo do estudo foi avaliar o aporte de nutrientes via precipitação pluviométrica incidente, bem como verificar as implicações da fertilização mineral sobre o balanço nutricional e sustentabilidade em uma plantação de *Eucalyptus dunnii* conduzida na região da campanha central do bioma Pampa.

8.2 MATERIAL E MÉTODOS

8.2.1 Amostragem da precipitação

A precipitação pluviométrica incidente foi avaliada em área aberta, adjacente à plantação de *Eucalyptus dunnii*, monitorada no período de fevereiro de 2011 até dezembro de 2013. Para a quantificação do volume de água, foram instalados três coletores com diâmetro de captação de 20 cm, e para a amostragem da água destinada à análise química, utilizaram-se três coletores com diâmetro de captação com 15 cm. Os coletores foram distanciados em 1,0 m entre si, a uma altura de 1,50 m acima do nível do solo.

As coletas foram realizadas quinzenalmente onde mensurou-se, por meio de proveta graduada, o volume precipitado individualmente em cada coletor de quantificação. Em seguida, obteve-se uma alíquota de cada coletor para análise química, sendo que, estas amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Ecologia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria. Na análise da água foram determinados os valores de pH, com pHmetro contendo eletrodo de vidro (Metrohm 827 pH LAB), com filtragem, utilizando-se filtro de poros de 0,45 μm. Foram analisados os íons N (NO_2^- + NH_4^+ + NO_3^-), S-SO_4^{2-}, K^+, Ca^{2+} e Mg^{2+}, por meio de cromatografia iônica (Metrohm 861 Advanced Compac IC), segundo a metodologia proposta pela American Public Health Association - APHA (1998).

Para obterem-se volumes de precipitação pluviométrica, em mililitros, para cada coleta de quantidade foi adotada a seguinte expressão: $Pt = V / ac$, em que: P = precipitação pluviométrica (mm), V = volume coletado (L), ac = área do coletor (m²) (SCHUMACHER e VIERA, 2015). Para a determinação das quantidades de nutrientes aportados, calculou-se o produto entre a concentração do elemento e o volume precipitado.

8.2.2 Análise estatística

Para análise estatística, realizou-se a transformação logarítmica dos dados individuais de concentração, visando à distribuição normal e a homogeneidade de variâncias, verificadas pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente (ANDRADE e OLIGARI, 2013). Após atender estes pressupostos (Apêndice C), para detecção de diferenças entre as concentrações médias de íons em função do mês em que a amostra foi coletada, aplicou-se o teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade de erro. Para a análise estatística dos dados considerou-se o delineamento inteiramente casualizado, com diferentes números de repetições, realizada através do programa estatístico Assistat versão 7.7 (SILVA e AZEVEDO, 2016).

8.3 Estimativa do balanço nutricional (BN)

A estimativa do balanço nutricional foi realizada aos 36 meses da plantação de *Eucalyptus dunnii*, que foi submetida às diferentes recomendações de fertilização (T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta, respectivamente), aplicadas aos 14 meses pós-plantio. Para cada tratamento foram consideradas as entradas de nutrientes via precipitação pluviométrica (Pt) e fertilização pré-plantio + cobertura (F), já as saídas consistem nas quantidades de nutrientes alocadas na biomassa da madeira do tronco (Bm), onde o balanço nutricional foi obtido através da relação: $BN = Pt + F - Bm$ (LIMA et al., 2002).

Informações sobre as quantidades adicionadas via fertilização estão detalhadas no item "Metodologia geral", ao passo que, os resultados sobre alocação de nutrientes na biomassa são oriundos do "Estudo 2 – Efeitos da fertilização mineral de cobertura na produtividade, estoques de nutrientes e carbono na biomassa de *Eucalyptus dunnii*"

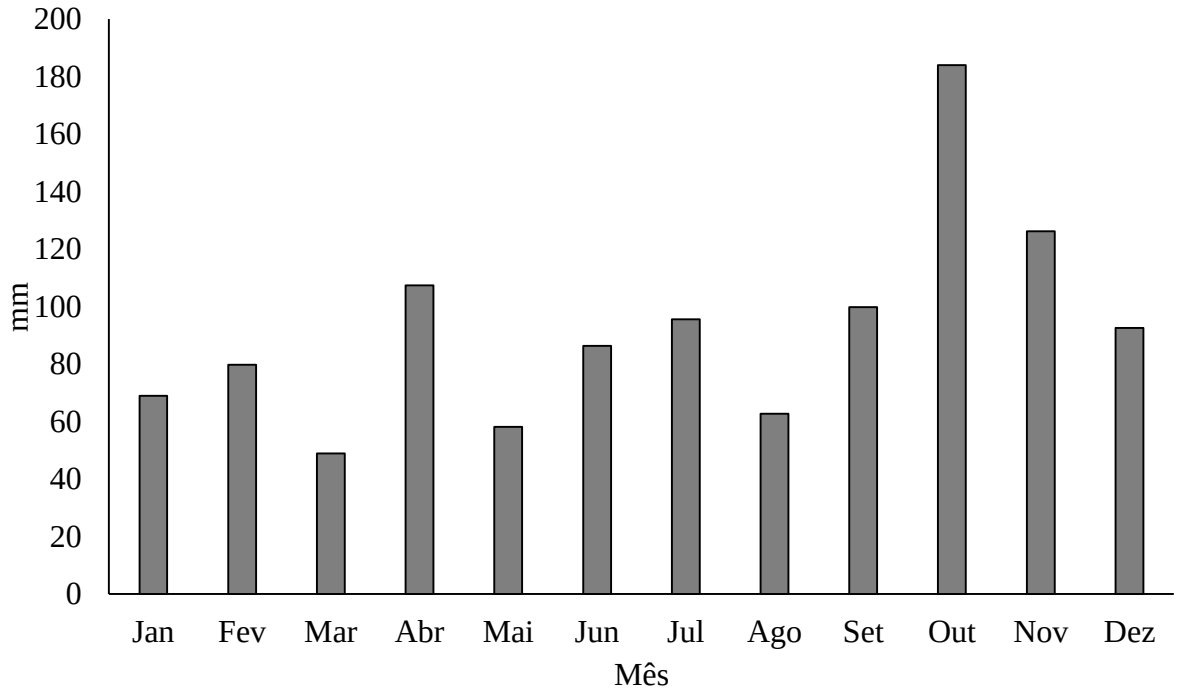
8.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

8.4.1 Distribuição da precipitação pluviométrica

Durante o período avaliado, as chuvas foram distribuídas ao longo de todos os meses, onde quantificou-se a precipitação pluviométrica média anual de 1.110,5 mm, com mínimas registradas nos meses de março (48,9 mm) e maio (58,2) e máximas em outubro e novembro (184,0 mm e 126,3 mm, respectivamente) (Figura 7). Com base na análise do histórico de precipitação da região (Figura 3), observaram-se menores volumes de precipitação, ocorridos

em virtude da influência do fenômeno “La Niña”, que atuou no Brasil no período de dezembro de 2011 a março de 2012, ocasionando chuva abaixo da média para o estado do Rio Grande do Sul (MELO, 2011).

Figura 7 - Valores médios mensais da precipitação pluviométrica ocorrida de 2011 a 2013 em plantação de *Eucalyptus dunnii* em São Gabriel/RS



Fonte: (Autor, 2018)

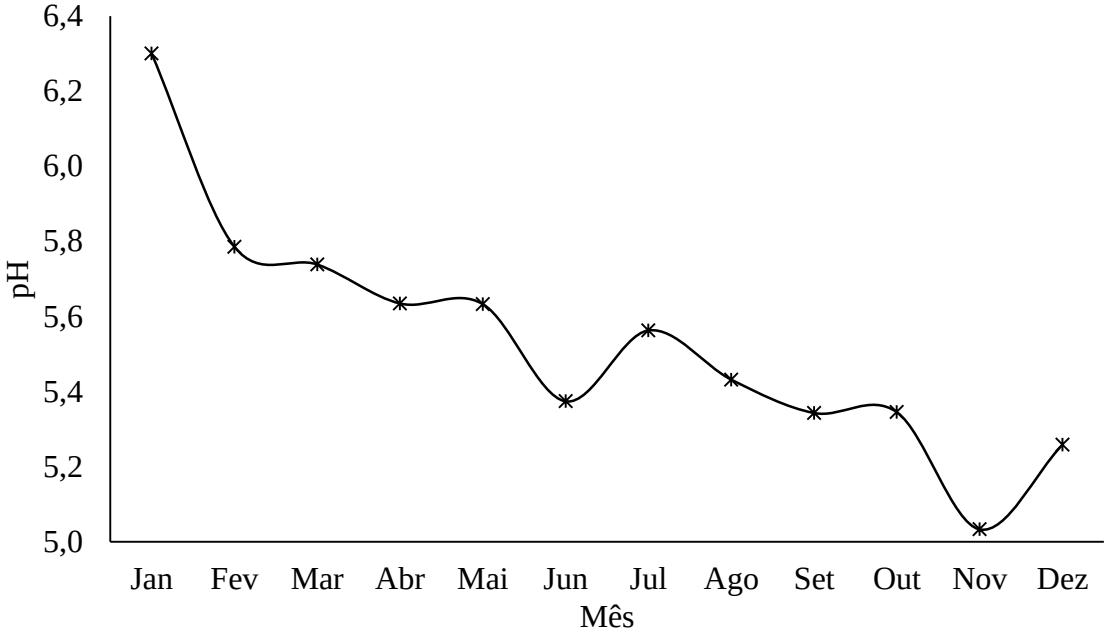
As implicações no crescimento e na produtividade da plantação de *Eucalyptus dunnii* podem não ser manifestadas em detrimento ao excesso e/ou escassez de chuvas, uma vez que, as espécies de eucalipto possuem ampla plasticidade ecofisiológica, que são determinantes do seu potencial elevado de adaptação às mais variadas regiões geográficas (MACEDO et al., 2014).

O menor índice de área foliar e a dinâmica sazonal também constituem um dos mecanismos que facilitam a passagem da precipitação pelo dossel para amenizar o déficit hídrico no solo (WHITEHEAD e BEADLE, 2004). Para a área de estudo, durante o período avaliado, momento em que a plantação ainda é jovem, ou seja, com dossel descontínuo, menor índice de área foliar, copa pouco densa e de arquitetura piramidal, maiores quantidades de precipitação podem ter incidido sobre o solo, contribuindo para o suprimento hídrico demandado pelas plantas.

8.4.2 Características químicas da precipitação pluviométrica

Os valores médios de pH da precipitação pluviométrica incidente (Figura 8) são ácidos e variaram ao longo dos meses, oscilando de 5,0 (mês de novembro) a 6,3 (mês de janeiro). Estas diferenças estão relacionadas ao volume precipitado, consequentemente, aos teores de cátions e ânions contidos na solução aquosa (CHANG, 2006). Os nutrientes podem influenciar o pH da água, por exemplo, Ca e Mg alcalinizam a chuva (WU et al., 2013) e a captação do NO_3^- podem contribuir para a redução do pH, pois lança radicais OH- ou COO- na solução aquosa (LACLAU et al., 2003). Em contrapartida, as maiores concentrações de SO_4^{2-} acidificam a precipitação, sendo que, a problemática da chuva ácida é um grave problema ecológico, acentuado pelas emissões exacerbadas deste elemento, entre outros poluentes (WU et al., 2013)

Figura 8 - Valores médios de pH da precipitação pluviométrica incidente de 2011 a 2013 em plantação de *Eucalyptus dunnii* em São Gabriel/RS



Fonte: (Autor, 2018)

A redução do valor de pH (acidificação) da precipitação pluviométrica, pode ser influenciada pelas queimadas dos campos, que é uma prática comum nas áreas da região central do bioma Pampa, utilizada como alternativa para renovação de pastagens e eliminação de plantas invasoras (VERDUM et al., 2014). O uso do fogo na vegetação afeta diretamente o pH

e a qualidade da chuva incidente em plantações florestais, que é enriquecida com elementos, tais como SO_4^{2-}, Ca, K e N, dentre outros, que são liberados da biomassa e lançados à atmosfera após as queimadas (LACLAU et al., 2003).

Em relação aos valores das concentrações de nutrientes (Tabela 11), estes não diferiram entre os meses, provavelmente em detrimento à elevada variabilidade (expressa pelo desvio padrão), condicionada pelos distintos volumes de precipitação de cada ano, que afetam diretamente a dinâmica dos nutrientes (CHANG, 2006). De modo geral, nos meses em que a precipitação foi menor (março e maio), os teores de N, S e Ca estiveram mais concentrados na solução aquosa. Isto ocorre, pois, a concentração de íons é inversamente proporcional à quantidade de água, uma vez que, quanto menor o volume de precipitação, menor será a diluição dos nutrientes em água e, consequentemente, maiores serão as concentrações (LACLAU et al., 2003).

Tabela 11 - Concentrações médias anuais dos nutrientes na precipitação pluviométrica incidente de 2011 a 2013 em plantação de *Eucalyptus dunnii*, São Gabriel/RS

	[1/]N_{total}	**S**	**K^+**	**Ca^{2+}**	**Mg^{2+}**
Mês	mg L^{-1}				
Jan	[2/ n.s.]0,44 ± 0,10	0,61 ± 0,13	0,52 ± 0,27	1,48 ± 0,12	0,23 ± 0,09
Fev	0,54 ± 0,09	0,47 ± 0,08	0,26 ± 0,21	1,02 ± 0,09	0,16 ± 0,06
Mar	0,69 ± 0,14	0,85 ± 0,59	1,43 ± 1,79	1,97 ± 0,61	0,26 ± 0,19
Abr	0,22 ± 0,05	0,36 ± 0,17	1,88 ± 2,67	1,76 ± 0,65	1,01 ± 1,42
Mai	1,27 ± 0,34	1,18 ± 1,19	0,99 ± 0,54	1,82 ± 0,99	0,12 ± 0,07
Jun	0,32 ± 0,09	0,43 ± 0,59	0,45 ± 0,27	2,04 ± 1,01	0,15 ± 0,05
Jul	0,23 ± 0,05	0,77 ± 0,55	0,15 ± 0,08	1,97 ± 0,70	0,06 ± 0,06
Ago	0,43 ± 0,12	0,87 ± 0,63	0,29 ± 0,02	1,14 ± 0,24	0,38 ± 0,49
Set	0,81 ± 0,23	1,12 ± 0,81	0,33 ± 0,11	1,23 ± 0,47	0,12 ± 0,05
Out	0,19 ± 0,05	0,31 ± 0,30	0,29 ± 0,17	1,61 ± 0,29	0,16 ± 0,18
Nov	0,39 ± 0,16	0,34 ± 0,42	0,82 ± 0,24	0,99 ± 0,36	0,11 ± 0,04
Dez	0,14 ± 0,04	0,39 ± 0,08	0,80 ± 0,98	0,60 ± 0,04	0,20 ± 0,16

[1/]Ntotal = NO_2^- + NH_4^+ + NO_3^-; [2/n.s.] Todas os contrastes entre as médias mensais não diferiram estatisticamente, pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.
Fonte: (Autor, 2018)

A tendência de concentração dos nutrientes na precipitação incidente seguiu a sequência de Ca > K > S > N > Mg. Maiores concentrações de S e Ca na solução aquosa também foram constatadas em precipitação sobre *Eucalyptus dunnii* na região de Alegrete (CÔRREA, 2011; DICK et al., no prelo); em plantação de *Eucalyptus* sp. no Congo (LACLAU et al., 2003); sobre *Acacia mangium* e *Dimocarpus longan* na China (SHEN et al., 2013); em floresta subtropical no Taiwan (WANG et al., 2004); em plantação de *Quercus ilex*, na Espanha (BELLOT e ESCARRE, 1991), dentre outros estudos. Cabe ressaltar que as concentrações de nutrientes variam em função da distribuição da precipitação, quantidade e composição química da poeira em suspensão atmosférica, época do ano e local de incidência (CALIL et al., 2010).

Partículas em suspensão na forma de poeiras (WU et al., 2013), fuligem lançada após as queimadas (LACLAU et al., 2003), volatilização de nutrientes adicionados via fertilização (CALIL et al., 2010), além da presença de resíduos de pó de calcário, oriundo da calagem em áreas cultivadas que circundam as plantações florestais, são fontes que liberam elementos como N, Ca, Mg e K para a atmosfera. Estes elementos acabam enriquecendo a solução da precipitação pluviométrica e contribuem à nutrição das árvores. Importante relatar que, estas deposições secas sobre as copas das árvores, são carreadas após a interceptação da água pelas folhas, que também lixivia metabólitos e escoa pelo tronco, consequentemente há aumento na concentração dos nutrientes que chegam ao solo (SHEN et al. 2013; HEARTSILL-SCALLEY et al., 2007; EISALOU et al., 2013; BALESTRINI et al., 2007; DEZZEO e CHACÓN, 2006).

A presença de elevadas concentrações de SO_4^{2-} na composição química da precipitação incidente, é apontada como uma das consequências das emissões antropogênicas, atividade industrial, emissão de gases provenientes da combustão de óleos obtidos a partir de petróleo, que vêm contribuindo para o aumento da poluição atmosférica, conforme relatado por Garten et al. (1988), Singer et al. (1996) e Armbruster et al. (2003). Laclau et al. (2003) também verificaram que altas concentrações de SO_4^{2-} na precipitação incidente em *Eucalyptus* sp., estiveram associadas à prática da queima intensa de biomassa no período seco.

8.4.3 Aportes de nutrientes via precipitação pluviométrica incidente

O aporte de nutrientes pela precipitação incidente, seguiu a tendência de K > S > Ca > N > Mg (Tabela 12), padrão semelhante ao constatado para as concentrações, evidenciando novamente a influência do volume de precipitação. Estas quantidades de nutrientes, dissolvidas na precipitação, contribuem significativamente à ciclagem biogeoquímica, pois se tornaram disponíveis às árvores de *Eucalyptus dunnii* assim que a água alcançou o solo e pôde ser

absorvida pelas raízes, todavia, parte dos elementos também é absorvida diretamente pelas folhas (BEGON et al., 2007).

Tabela 12 - Quantidades médias anuais de nutrientes na precipitação pluviométrica incidente de 2011 a 2013 em plantação de *Eucalyptus dunnii*, São Gabriel/RS

	[1/]N_{total}	S	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
Mês			**kg ha^{-1}**		
Jan	0,30	0,42	0,36	0,12	0,16
Fev	0,43	0,37	0,21	0,12	0,13
Mar	0,34	0,42	0,70	0,35	0,13
Abr	0,24	0,39	2,02	1,40	1,09
Mai	0,74	0,69	0,58	0,30	0,07
Jun	0,28	0,37	0,39	0,24	0,13
Jul	0,22	0,74	0,14	0,09	0,06
Ago	0,27	0,55	0,18	0,10	0,24
Set	0,81	1,12	0,33	0,22	0,12
Out	0,35	0,57	0,53	0,50	0,29
Nov	0,49	0,43	1,04	0,78	0,14
Dez	0,13	0,36	0,74	0,48	0,19
Total	**4,60**	**6,43**	**7,22**	**4,71**	**2,75**

[1/]Ntotal = NO_2^- + NH_4^+ + NO_3^-

Fonte: (Autor, 2018)

O aporte de K sob a plantação de *Eucalyptus dunnii* avaliada no presente estudo foi superior ao observado por Corrêa (2011), Dick et al. (no prelo), Laclau et al. (2010a) e Ashagrie e Zech (2010), onde os referidos autores observaram maiores quantidade de Ca e S na precipitação incidente em plantações de eucalipto. Este aporte de K via precipitação pluviométrica, equivaleu a 22% da quantidade adicionada na fertilização mineral de pré-plantio, detalhada no item “Metodologia geral”, sendo que, maiores quantidades de K na solução aquosa podem estar relacionadas aos eventos de queimadas dos campos, conforme discutido anteriormente. Estas entradas contribuem significativamente à nutrição florestal, pois o potássio é um nutriente muito importante para a silvicultura do eucalipto, em detrimento à alta demanda

fisiológica (TAIZ e ZEIGER, 2013) e pela limitação em função da baixa disponibilidade nos solos cultivados (BARROS et al., 2014).

A precipitação pluviométrica incidente otimizou a ciclagem geoquímica de K, que junto da adição deste nutriente via fertilização mineral, constituem uma via de entrada importante às plantações florestais, uma vez que, este elemento lixivia rapidamente depois de incorporado ao solo (ERNANI et al., 2007). A precipitação também constituiu fonte importante de N às plantações, correspondendo a 11% da quantidade adicionada na fertilização mineral de pré-plantio do *Eucalyptus dunnii* avaliado. Este resultado é de extrema importância pois, o N é o nutriente que mais limita a produtividade na eucaliptocultura brasileira, e apesar das fertilizações, as perdas por volatilização podem atingir 45% (BARROS et al., 2014). As quantidades aportadas de Ca e Mg via solução aquosa também podem complementar a nutrição à medida em que houver a redução do efeito residual da calagem, aplicada antes do plantio das mudas de *Eucalyptus dunnii*.

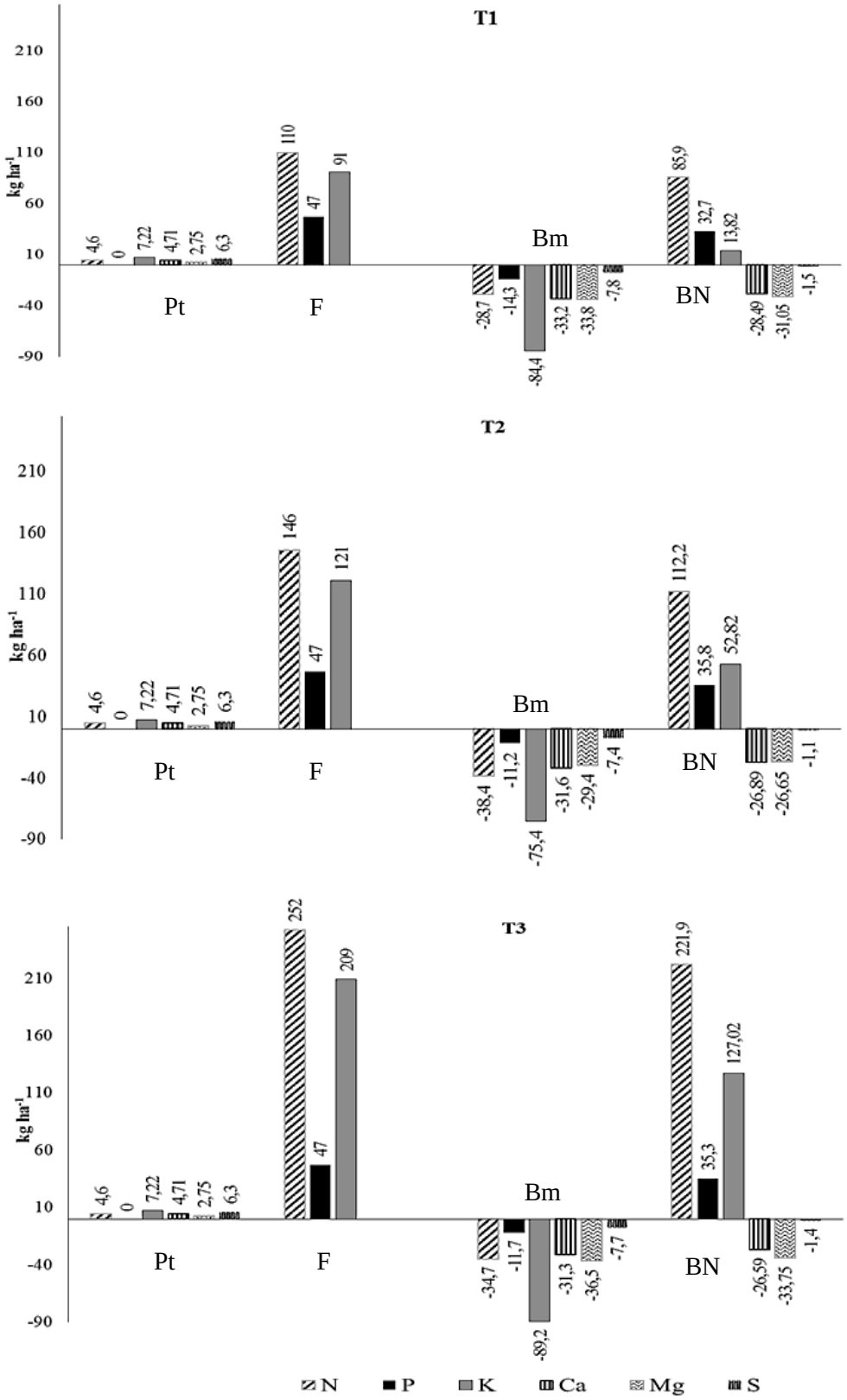
Apesar das menores entradas de Mg registradas neste trabalho e em demais estudos (CORRÊA, 2011; LACLAU et al., 2010a; ASHAGRIE e ZECH, 2010), Armbruster et al. (2002) observaram que o aporte variou de 0,24 a 22,5 kg ha^{-1} ano^{-1} via precipitação incidente em florestas na Europa, sendo que, estas flutuações foram atribuídas aos efeitos da poeira e da distância da área avaliada em relação ao mar (efeito do *spray* marinho). Os autores relatam ainda que, a precipitação é a fonte mais importante para a ciclagem biogeoquímica de Mg nestes ecossistemas, uma vez que, há elevadas perdas por lixiviação e escoamento no solo.

Em virtude da relevante contribuição da água da chuva para a entrada de nutrientes, estratégias de manejo de adubação devem ser adotadas com base nestes estudos que avaliam a composição química da água. Com estes resultados, até mesmo as recomendações de fertilizantes podem ser otimizadas, através da redução futura de N e K, evitando-se assim dispêndios de nutrientes e redução de custos nas operações florestais. Conhecendo-se as quantidades aportadas, para os diferentes íons, através da deposição úmida será possível estimar o balanço dos nutrientes neste sítio.

8.5 Balanço nutricional em plantação de *Eucalyptus dunnii*

Considerando o cenário de remoção da madeira do tronco, aos 36 meses da plantação de *Eucalyptus dunnii*, o BN foi positivo para os nutrientes N, P e K e negativo para Ca, Mg e S, em todos os tratamentos (Figura 9).

Figura 9 - Balanço nutricional em plantação de *Eucalyptus dunnii* submetida a diferentes recomendações de fertilização mineral



Onde: Pt = precipitação pluviométrica; F = fertilização pré-plantio + cobertura; Bm = biomassa da madeira do tronco; BN (balanço nutricional) = Pt + F – Bm; T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta, respectivamente

Fonte: (Autor, 2018)

Quando o balanço final para os nutrientes é positivo, permite-se a afirmativa de que os plantios de eucalipto, quando corretamente manejados, não exaurem o solo, podendo sim beneficiá-lo (GATTO et al., 2014). O balanço de nutrientes positivo também indica possibilidade de maiores produtividades (CUNHA et al., 2005). É importante salientar que esta simulação foi realizada aos 36 meses após o plantio, onde na colheita da madeira de árvores em idades mais jovens, a imobilização de nutrientes é menor. A dinâmica de acúmulo de biomassa e alocação de nutrientes tende a aumentar com o avanço da rotação, consequentemente, o balanço será alterado pois as remoções através da colheita da madeira do tronco serão maiores.

Combinada à fertilização de pré-plantio, o tratamento T1 foi suficiente para proporcionar o BN positivo, no entanto, as maiores recomendações de N e K adicionadas via fertilização mineral em cobertura (T2 e T3), implicaram em aumento expressivo no suprimento nutricional, o que pode ser fundamental à longo prazo, pois a dinâmica de acúmulo de biomassa e alocação de nutrientes tende a aumentar com o avanço da rotação, consequentemente as remoções através da colheita da madeira do tronco serão maiores, podendo acarretar em exaustão de minerais do sítio e comprometimento nutricional às futuras rotações (CUNHA et al., 2005; LIMA et al., 2002; TURNER e LAMBERT, 2008; SANTANA et al., 2008).

Em *Eucalyptus saligna,* mesmo após a entrada pela precipitação pluviométrica de 27, 37 e 9 kg ha^{-1} de K, Ca e Mg, respectivamente, além da fertilização com 12 kg ha^{-1} de K e 61 kg ha^{-1} de Ca, o balanço nutricional foi negativo para todos os nutrientes, em detrimento ao elevado estoque contido na madeira do tronco, colhida aos sete anos de idade da plantação (LIMA et al., 2002). Na exploração do eucalipto, a grande exportação de biomassa resulta em grandes saídas de nutrientes, reduzindo a disponibilidade destes para as futuras plantações (PEREIRA et al., 2012).

Visando a manutenção da sustentabilidade, deve-se preconizar pela remoção somente da madeira do tronco aliada à manutenção dos resíduos, pois se houver a retirada da casca do tronco, grandes quantidades de Ca serão exportadas, tanto quanto a remoção das folhas implicaria em elevadas perdas de N, em função dos elevados estoques destes nutrientes nestes componentes (Tabela 10). Este manejo da colheita é de extrema importância pois, em plantações com quatro anos de idade, Guimarães et al. (2015) constataram que o Ca foi um dos elementos que apresentaram o maior risco para a manutenção da produtividade de *Eucalyptus dunnii* cultivados em solos distróficos no bioma Pampa. A sustentabilidade foi severamente comprometida quando removida a biomassa total de árvores de eucalipto, cultivadas no Congo, onde Laclau et al. (2005) relataram que haveria um déficit de mais de 250 kg ha^{-1} de N no sítio.

Apesar das entradas via precipitação pluviométrica, haverá necessidade de reposição de Ca, Mg e S para a manutenção da sustentabilidade nutricional e em função da remoção da madeira do tronco, combinado aos baixos teores no solo (Tabela 4), o balanço negativo para Ca e Mg pode ser limitante à plantação, no entanto, espera-se que, o suprimento destes e de outros nutrientes seja otimizado futuramente em função da decomposição dos resíduos do ciclo anterior e produção/decomposição de serapilheira da plantação de *Eucalyptus dunnii*.

Nas fases iniciais de crescimento a planta atua, primordialmente, como dreno de nutrientes disponíveis no solo, por isso, as fertilizações de pré-plantio e de cobertura são importantes para manter a produtividade (SANTANA et al., 2014). À medida em que o tempo de rotação avançará, haverá produção e decomposição de serapilheira, com posterior ciclagem de nutrientes, onde as árvores passarão a ser fonte de nutrientes ao solo, sendo que, neste processo o cálcio é um dos elementos encontrados em maiores concentrações na serapilheira foliar em plantações de *Eucalyptus* (GATTO et al., 2014; ZAIA e GAMA, 2004; LUDVICHAK et al., 2016).

8.6 CONCLUSÕES

Por meio da ciclagem geoquímica, aportes de nutrientes importantes à nutrição florestal, foram incorporados via precipitação pluviométrica incidente na plantação de *Eucalyptus dunnii*. A solução aquosa continha o equivalente a 22% de K e 11% de N das quantidades adicionadas na fertilização pré-plantio desta área de estudo, sendo assim, pode-se reduzir a recomendação destes minerais em futuras rotações. Cabe destacar que estas entradas de nutrientes também podem ter contribuído para a melhoria da fertilidade do solo, promovida pelo aumento nos teores de K, Ca e Mg.

Aos 36 meses de idade de plantação de *Eucalyptus dunnii*, o balanço nutricional foi positivo para N, P e K e negativo para Ca, Mg e S, independentemente da recomendação de fertilizante. Visando a sustentabilidade nutricional, apesar das entradas via precipitação pluviométrica, deve-se atentar ao fornecimento de S às plantas, bem como Ca e Mg, pois à medida em que houver aumento na produção e acúmulo de nutrientes na biomassa até a idade de corte, a capacidade produtiva do solo poderá ser comprometida.

9 CONCLUSÕES GERAIS

A hipótese de que a intensificação da ciclagem geoquímica, através do aumento das recomendações de fertilizante mineral, em cobertura, alterasse o estoque de nutrientes no solo foi confirmada para o K e para os nutrientes P, Ca e Mg desde que combinada aos efeitos residuais da adubação pré-plantio. No entanto, a hipótese não se aplicou à produção de biomassa, estoque de carbono e acúmulo de nutrientes nos componentes das árvores de *Eucalyptus dunnii*. Quanto aos efeitos sobre a produtividade, não houve influência sobre o DAP das plantas, apesar da dose T3 promover maior volume individual, este foi refletido pelo aumento da altura.

Pode-se considerar que a produtividade e produção de biomassa foram expressivas e satisfatórias para o sítio e idade da plantação, onde acredita-se que o suprimento nutricional fornecido pela fertilização de pré-plantio combinada à fertilização padrão (T1) foi suficiente ao desenvolvimento das plantas até o período monitorado, que compreendeu os 36 meses após o plantio. As respostas ao aumento da recomendação de fertilizante não foram significativas, pois adicionar elevadas quantidades de nutrientes nem sempre implica em maiores obtenções de volume de madeira e produção de biomassa. Há fatores intrínsecos às plantas, como variabilidade genética e dinâmica da ciclagem bioquímica, além de reações e interações do fertilizante com o solo, que podem reduzir ou retardar a disponibilidade à absorção radicular, sendo que, os reflexos poderão ser evidenciados somente com o avanço da rotação.

Todas as recomendações de fertilizante resultaram em um balanço nutricional positivo para N, P e K, no entanto, apesar das entradas via precipitação pluviométrica, há balanço negativo de Ca, Mg e S, o que pode comprometer a manutenção da sustentabilidade nutricional. Através da ciclagem biogeoquímica, nutrientes retornarão ao solo após a decomposição de serapilheira, além da dinâmica de acúmulo de biomassa e alocação de nutrientes aumentar com o avanço da rotação, consequentemente as remoções através da colheita da madeira do tronco serão maiores, podendo acarretar em exaustão de minerais do sítio. Portanto, recomenda-se que sejam realizados estudos sobre a produção de serapilheira e devolução de nutrientes, bem como análises sobre a produção de biomassa e alocação de nutrientes ao término da rotação.

De forma geral, até os 36 meses de idade da plantação, em função das respostas obtidas, especialmente sobre a produtividade e biomassa, visando a redução de custos e impactos ambientais, a fertilização padrão (T1 = 150 g planta^{-1} de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24), em cobertura, pode ser recomendada para a condução de plantações de *Eucalyptus dunnii* em Cambissolo, na região da campanha central do bioma Pampa.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico 2013: ano base 2012.** Disponível em: http://www.abraflor.org.br. Acesso em: 29/09/2017.

AGEFLOR - ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS. **A indústria de base florestal no RS:** dados e fatos – Ano base 2014. Porto Alegre, RS: AGEFLOR, 2015. 40p.

AGNELI, A. Indicação para escolha de espécies de *Eucalyptus.* **IPEF,** 2005. Disponível em: http//www.ipef.br/identificacao/eucalyptus/indicacoes.asp. Acesso em: 21 mar 2017.

ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v.22, n.6, p :711–728, 2014.

ANDRADE, D. F. OLIGARI, P. J. **Estatística para as ciências agrárias e biológicas: com noções de experimentação.** 3ed. Editora UFSC: Santa Catarina, 2013. 475p.

APHA **- Standard methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation: Washington, D.C. 19ed, 1998.

ARAÚJO, A.P.A.; MACHADO, C.T.T. Fósforo. In: FERNANDES, M.S. (ed) **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: SBCS, 2006, 432p.

ARMBRUSTER, M.; ABIY, M.; FEGER, K-H. The biogeochemistry of two forested catchments in the Black Forest and the eastern Ore Mountains (Germany). **Biogeochemistry**. v.65, p.341–368, 2003.

ARMBRUSTER, M. et al. Throughfall and output fluxes of Mg in European forest ecosystems: a regional assessment. **Forest Ecology and Management**. v.164, p: 137–147, 2002.

ASSIS, M.R. et al. Modelagem da biomassa e do estoque de carbono em plantas jovens de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. v.43, n.105, p: 225-233, 2015.

ASHAGRIE, Y.; ZECH, W. Dynamics of dissolved nutrients in forest floor leachates: comparison of a natural forest ecosystem with monoculture of tree species plantations in south-east Ethiopia. **Ecohydrology & Hydrobiology**. v.10, n.2-4, p: 183-190, 2010.

BALESTRINI, R. et al. Dry deposition of particles and canopy exchange: Comparison of wet, bulk and throughfall deposition at five forest sites in Italy. **Atmospheric Environment**. v.41, p: 745–756, 2007.

BAPTISTA, J.; LEVIEN, R. Métodos de preparo de solo e sua influência na erosão hídrica e no acúmulo de biomassa da parte aérea de *Eucalyptus saligna* em um Cambissolo Háplico da depressão central do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**. v.34, n.4, p: 567-575, 2010.

BARRETO, L.V. et al. Eutrofização em rios brasileiros. **Enciclopédia Biosfera**. v.9, n.16; p: 2165-2179, 2013.

BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. Nutrição e adubação mineral do Eucalipto. In: VALE, A.B. et al. **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência.** Editora UFV, 1ed, Viçosa: UFV, 2014. p: 187-207.

BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. Mineral fertilizer recommendations for eucalypt plantations. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (org). **Forest Nutrition and fertilization.** IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2.ed. Piracicaba, SP, 2004, p. 269 -284.

BARROS, N.F. et al. NUTRICALC 2.0 – Sistema para cálculo del balance nutricional y recomendacion de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. **Bosque.** v.16, p: 129-131, 1995.

BATTIE-LACLAU, P. et al. Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management.** v.364, p: 77–89, 2016.

BAYER, C.; MIELNICZUK, L. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A. et al. (eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Editora Metrópole, 2ed. Porto Alegre, 2008. 654 p.

BEGON, M.; TOWNSEND, C.R.; HARPER, J.L. **Ecologia: de indivíduos a ecossistemas.** Editora Artmed, 4ed. Porto Alegre, 2007, 752 p.

BELDINI, T.P. et al. The effect of plantation silviculture on soil organic matter and particle-size fractions in Amazonia**. Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.33, p:1593-1602, 2009.

BELLOT, J.A.; ESCARRE, A. Chemical characteristics and temporal variations of nutrients in throughfall and stemflow of three species in Mediterranean holm oak forest. **Forest Ecology and Management**, v.41, p.125-135, 1991.

BELLOTE, A.F.J.; FERREIRA, C.A. Nutrientes minerais e crescimento de árvores adubadas de *Eucalyptus grandis*, na região do cerrado, no estado de São Paulo. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n.21/27, p:17-28, 1993.

BERGER, R. et al. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**. v.12, n. 2, p: 75-87, 2002.

BINKLEY, D. et al. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v.405, p: 271–283, 2017.

BOLDRINI, I. I. et al. **Bioma Pampa**: diversidade florística e fisionômica. Editora Pallotti, Porto Alegre, RS, 2010. 64p.

BOOTH, T.H. et al. Native forests and climate change: Lessons from eucalypts. **Forest Ecology and Management**. v.347, p: 18–29, 2015.

BOOTH, T.H. Eucalypt plantations and climate change. **Forest Ecology and Management,** v301, p: 28–34, 2013.

BRONDANI, G.E. et al. Miniestaquia de *Eucalyptus benthamii* × *Eucalyptus dunnii*: (II) sobrevivência e enraizamento de miniestacas em função das coletas e estações do ano. **Ciência Florestal**, v.20, n.3, p: 453-465, 2010.

BROOKER, M.I.H.; KLEINIG, D.A. **Field guide to** *Eucalyptus.* Editora Inkata Press, Sydney, 1994. 383 p.

CALIL, F.N. et al. Ion input via rainwater in southwestern region of Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista Cerne.** v.16, n.3, p: 373-380. 2010.

CARNOL, M.; BAZGIR, M. Nutrient return to the forest floor through litter and throughfall under 7 forest species after conversion from Norway spruce. **Forest Ecology and Management.** v.309, p: 66–75, 2013.

CASTRO, P.S. **Influência da cobertura florestal na qualidade da água em bacias hidrográficas na região de Viçosa, MG.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP, Piracicaba, SP. 1980.

CAVICHIOLLO, S.R.; DEDECEK, R.A.; GAVA, J.L. Preparo de solo e o estado nutricional da rebrota de *Eucalyptus grandis.* **Scientia forestalis**, n.66, p: 120-127, 2004.

CHANG, M. **Forest Hydrology: An introduction to water and forests.** Editora Taylor & Francis Group, 2.ed. USA. 2006, 474p.

CORRÊA, R.S. **Ciclagem de nutrientes em** *Eucalyptus dunnii* **estabelecido no bioma Pampa.** PPGEF/UFSM, 2011. 99p. Tese Doutorado.

CORREIA, M.E.F.; ANDRADE, A.G. Formação de serapilheira e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A. et al. (eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Editora Metrópole, 2ed. Porto Alegre. 2008, 654 p.

COSTA, D.D.; KEMPKA, A.P.; SKORONSKI, E. A contaminação de mananciais de abastecimento pelo nitrato: o panorama do problema no Brasil, suas consequências e as soluções potenciais. **Revista Eletrônica do PRODEMA.** v.10, n.2, p: 49-61, 2016.

CQFS - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** Editora Pallotti, 11ed, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016, 376p.

CROMER, R.N. et al. Response to nutrients in *Eucalyptus grandis*: 1. Biomass accumulation. **Forest Ecology and Management**. v.62, p: 211-230, 1993.

CUNHA, G.M.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; COSTA, G.S. Ciclagem de nutrientes em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no norte fluminense. **Revista Árvore**. v.29, n.3, p:353-363, 2005.

D'AVILA, F.S. et al. Efeito do potássio na fase de rustificação de mudas clonais de eucalipto. **Revista Árvore**. v.35, n.1, p: 13-19, 2011.

DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R.F. et al. (eds.) **Fertilidade do solo**. Editora UFV - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1ed. Viçosa/MG, 2007. p.91-132.

DEZZEO, N.; CHACÓN, N. Nutrient fluxes in incident rainfall, throughfall, and stemflow in adjacent primary and secondary forests of the Gran Sabana, southern Venezuela. **Forest Ecology and Management.** v.234, p: 218–226, 2006.

DIAS, L.P.R. et al. Substituição parcial de fosfato solúvel por natural na implantação de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus dunnii* no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.38, p: 516-523, 2014.

_____. Eficiência relativa de fosfatos naturais na adubação de plantio de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden e *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage em solo sem e com calagem. **Ciência Florestal**. v.25, n.1, p: 37-48, 2015.

DICK, G. et al. Nutrient input via incident rainfall in a *Eucalyptus dunnii* stand in the Pampa biome. **Floram**, no prelo.

_____. Micronutrients and biomass in *Eucalyptus dunnii* Maiden stand. **Revista Árvore.** v.41, n.1, e:410113, 2017.

_____. Produção de raízes finas em um povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden em área do bioma Pampa. **Informe técnico n.58**, Centro de Ciências Rurais, UFSM, 2016a.

_____. Quantificação da biomassa e nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden estabelecido no bioma Pampa. **Ecologia e Nutrição Florestal**. v.4, n.1, p: 01-09, 2016e.

DICK, G.; SCHUMACHER, M.V.; MOMOLLI, D.R. Caracterização da fertilidade do solo em um povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden no bioma Pampa do Rio Grande do Sul. **Ecologia e Nutrição Florestal**. v.4, n.3, p: 68-77, 2016b.

_____. **Aspectos nutricionais de *Eucalyptus dunnii* no sul do Brasil.** Editora Novas Edições Acadêmicas, 1ed, Düsseldorf/Alemanha, 2016f, 61p.

_____. Estratégias para a restauração de área de preservação permanente no bioma Pampa. In: I Congresso Internacional do Pampa e do III Seminário da Sustentabilidade da Região da Campanha. **Anais...** Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016c. Disponível em: http://coral.ufsm.br/cipa/index.php/anais. Acesso em: 10/04/2017.

_____. **Bioindicadores em diferentes coberturas do solo no bioma Pampa**: artrópodes epigéicos. Editora Novas Edições Acadêmicas, 1ed, Düsseldorf/Alemanha, 2016d, 57p.

DICK, G.; SCHUMACHER, M.V. Adição de sulfato via precipitação incidente em *Eucalyptus dunnii* na região da campanha central, RS. In: 32ª Jornada Acadêmica Integrada. **Anais...** Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2017.

DINIZ, A.R. et al. Precipitação e aporte de nutrientes em diferentes estádios sucessionais de Floresta Atlântica, Pinheiral – RJ. **Ciência Florestal**. v.23, n.3, p: 389-399, 2013.

DUAN, L. et al. Acid deposition in Asia: Emissions, deposition, and ecosystem effects. **Atmospheric Environment.** v.146, p: 55-69, 2016.

EISALOU, H.K. et al. Effects of forest canopy cover and floor on chemical quality of water in broad leaved and coniferous forests of Istanbul, Turkey. **Forest Ecology and Management**. v.289, p: 371–377, 2013.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Embrapa Solos, 3ed. Rio de Janeiro/RJ, 2013. 306p.

_____. **Manual de métodos de análises de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos 2ed. Rio de Janeiro, 1997.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas**: princípios e perspectivas. Editora Planta, Londrina, PR, 2006.

ERNANI, P.R.; ALMEIDA, J.A.; SANTOS, F.C. Fósforo. In: NOVAIS, R.F. et al. (eds.) **Fertilidade do solo**. Editora UFV - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1ed. Viçosa/MG, 2007.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITATE NATIONS. **Global Forest Resources Assessment 2015**: How are the world's forests changing?. 2ed. Roma: FAO, 2016. 54p.

_____. **Status of the World's Soil Resources**: Main report Prepared by Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS) Rome, 2015, 648p.

FARIA, G.E. et al. Características químicas do solo em diferentes distâncias do tronco de eucalipto e em diferentes profundidades. **Revista Árvore.** v.33, n.5, p:799-810, 2009.

_____. Produção e estado nutricional de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em segunda rotação, em resposta à adubação potássica. **Revista Árvore**. v.26, n.5, p: 577-584, 2002.

FERNANDEZ, J.Q.P. et al. Productivity of *Eucalyptus camaldulensis* affected by rate and placement of two phosphorus fertilizers to a Brazilian Oxisol. **Forest Ecology and Management.** v.127, p: 93–102, 2000.

FERRANDO, M.G.; ZAMALVIDE, J.P. Aplicación de boro en eucalipto: comparación de fuentes. **Revista Árvore**. v.36, n.6, p: 1191-1197, 2012.

FERREIRA, M. A aventura dos Eucaliptos. In: SCHUMACHER, M. V. VIERA, M. **Silvicultura do Eucalipto no Brasil**. Editora UFSM, Santa Maria, 2015. 308p.

FERREIRA, E.V.O. et al. Differential behavior of young Eucalyptus clones in response to nitrogen supply. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.39, p: 809-820, 2015.

FILHO, E.; SANTOS, P.E.T. Considerações sobre o plantio de *Eucalyptus dunnii* no Estado do Paraná. **Comunicado Técnico 141**. Colombo, PR. Dezembro, 2005.

FINGER, C.A.G. et al. Funções de forma para *Eucalyptus dunnii* Maiden implantados na depressão central e encosta do sudeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural.** v.25, n.3, p: 399-403, 1995.

FLORES, T.B. et al. ***Eucalyptus* no Brasil: zoneamento climático e guia para identificação**. IPEF, Piracicaba, SP. 2016, 448p.

GARTEN, C.T.; BONDIETTI, E.A.; LOMAX, R.D. Contribution of foliar leaching and dry deposition to sulfate in net throughfall below deciduous trees. **Atmospheric Environment**. v.22, n.7, p: 1425-1432, 1988.

GATTO, A. et al. Ciclagem e balanço de nutrientes no sistema solo-planta em um plantio de *Eucalyptus* sp. no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.38, p: 879-887, 2014.

_____. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região centro-leste do estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**. v.35, n.4, p: 895-905, 2011

GAVA, J.L. et al. Eficiência relativa de fertilizantes fosfatados no crescimento inicial de eucalipto cultivado em solos do Cerrado. **Revista Brasilera de Ciência do Solo**. v.21, p: 497-504, 1997.

GLENCROSS, K. et al. Basal area increment is unaffected by thinning intensity in young *Eucalyptus dunnii* and *Corymbia variegata* plantations across different quality sites. **Forest Ecology and Management.** v.138, p: 326–333, 2014.

GONÇALVES, J.L.M. et al. Caracterização edafoclimática e manejo de solos das áreas com plantações de eucalipto. In: SCHUMACHER, M.V. VIERA, M. **Silvicultura do Eucalipto no Brasil**. Editora UFSM, Santa Maria. 2015, 308p.

_____. An evaluation of minimum and intensive soil preparation regarding fertility and tree nutrition. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Forestry nutrition and fertilization**. IPEF: Piracicaba, 2004. p. 13-64.

GONÇALVES, J.L.M.; MENDES, K.C.F.S.; SASAKI, C.M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.25, n.3, p: 601-616, 2001.

GONÇALVES, J.L.M. Conservação do solo. In: **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. IPEF- Instituo de Pesquisas e estudos florestais – Piracicaba, 2002. 498p.

_____. Recomendações de adubação para Eucalyptus, Pinus e Espécies Típicas da Mata Atlântica. Documentos Florestais, n.15, p: 1-23, 1995.

GRACIANO, C.; GUIAMÉT, J.J.; GOYA, J.F. Impact of nitrogen and phosphorus fertilization on drought responses in *Eucalyptus grandis* seedlings. **Forest Ecology and Management.** v.212, p: 40–49, 2005.

GRANT, C.A. et al. importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações Agronômicas,** POTAFOS - Associação Brasileira Para Pesquisa Da Potassa E Do Fosfato, n.95, 2001.

GRESPAN, S.L.; DIAS, L.E.; NOVAIS, R.F. Crescimento e parâmetros cinéticos de absorçãode amônio e nitrato por mudas de *Eucalyptus* spp submetidas a diferentes relações amônio/nitrato na presença e ausência de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.22, p: 667-674, 1998.

GUEDES, M.C. et al. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasilera de Ciência do Solo.** v.30, p: 267-280, 2006.

GUIMARÃES, C.C. et al. Biomassa e nutrientes em povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden no pampa gaúcho. **Revista Árvore**. v.39, n.5, p: 873-882, 2015.

GUPTA, U.C. Micronutrientes e elementos tóxicos em plantas e animais. In: FEREIRA, M.E. et al. (eds). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Editora Potafos, Jaboticabal, SP. CNPq/FAPESP. 2001. 600 p.

GUTIÉRREZ, G. L. **Atlas del eucalipto**. Editora Sevilla, v.1, 1976.

HEARTSILL-SCALLEY, T. et al. Disturbance and long-term patterns of rainfall and throughfall nutrient fluxes in a subtropical wet forest in Puerto Rico. **Journal of Hydrology**. v.333, p: 472– 485, 2007.

HERNÁNDEZ, J. et al. Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a *Eucalyptus dunnii* Maiden plantation in temperate climate of Uruguay. **Forest Ecology and Management**. v.258, p: 92-99, 2009.

HIGA, R.C.V. et al. Resistência e resiliência a geadas em *Eucalyptus dunnii* Maiden plantados em Campo do Tenente, PR. **Boletim de Pesquisa Florestal**. n.40, p: 67-76, 2000.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Dados e estatísticas 2017**. Disponível em: <http://iba.org/pt/dados-e-estatisticas/cenarios-iba>. Acesso em: 15 jan. 2018.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/. Acesso em: 12/01/2016.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**. Fenômeno El Niño atua com forte intensidade no oceano pacífico equatorial.** Disponível em: http://enos.cptec.inpe.br/. Acesso em: 12/01/2016.

IPEF – INSTITUTO DE PESQUISAS FLORESTAIS. Chave de Identificação de Espécies Florestais. Disponível em: http://www.ipef.br/identificacao/cief/especies/dunnii.asp. Acesso em: 12 de dez 2015.

JESUS, G.L. et al. Doses e fontes de nitrogênio na produtividade do eucalipto e nas frações da matéria orgânica em solo da região do cerrado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.36, p: 201-214, 2012.

JOSÉ, J.F.B.S. et al. Boron mobility in *Eucalyptus* clones. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.33, p: 1733-1744, 2009.

KLEIN, C.; AGNE, S.A.A. Fósforo: de nutriente à poluente! **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental.** v.8, n.8, p: 1713-1721, 2012.

LACLAU, J-P. et al. Productivity in Tropical Plantations Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations: Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**. v.259, p: 1771-1785, 2010a.

_____. Organic residue mass at planting is an excellent predictor of tree growth in Eucalyptus plantations established on a sandy tropical soil. **Forest Ecology and Management**. v.260, p: 2148–2159, 2010b.

_____. Nutrient cycling in a clonal stand of Eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo 3. Input–output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. **Forest Ecology and Management**. v.210, p: 375–391, 2005.

_____. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo 3: Chemical composition of rainfall, throughfall and stemflow solutions. **Forest Ecology and Management.** v.176, p: 105-119, 2003.

LACLAU, J-P; BOUILLET, J-P.; RANGER, J. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of Eucalyptus in Congo. **Forest Ecology and Management.** v.128, p: 181–196, 2000.

LEITE, F. P. Conservação de solo e água. In: VALE, A. B. et al. **Eucaliptocultura no Brasil: Silvicultura, manejo e ambiência.** Editora UFV, 1ed, Viçosa, MG. 2014. 551 p.

LEITE, F. P. et al. Manganese accumulation and its relation to "eucalyptus shoot blight in the Vale do Rio Doce". **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.38, p: 193-204, 2014.

_____. Nutrient relations during an eucalyptus cycle at different population densities. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.35, p: 949-959, 2011.

_____. Alterations of soil chemical properties by eucalyptus cultivation in five regions in the Rio Doce Valley. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.34, p: 821-831, 2010.

LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. Editora USP: São Paulo, 1996. 307p.

LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B.; CÂMARA, C.D. Implicações da colheita florestal e do preparo do solo na erosão e assoreamento de bacias hidrográficas. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais.** Piracicaba: IPEF, 2002. 498p.

LOPES, D.; ARANHA, J. Avaliação do conteúdo de carbono na matéria seca de diferentes componentes de árvores de *Eucalyptus globulus* e de *Pinus pinaster*. **Silva Lusitana.** v.14, n.2, p: 149 - 154, 2006.

LOPES, A.S; ABREU, C.A. Micronutrientes na agricultura brasileira: evolução histórica e futura. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (eds). **Tópicos em Ciência do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG. Vol. 1. 2000. 352 p.

LOUW, J.H. A site-growth study of *Eucalyptus grandis* in the Mpumalanga Escarpment area. **Southern African Forestry Journal**. n.180, p: 1-13, 1997.

LUDVICHAK, A.A. et al. Nutrient return through litterfall in a *Eucalyptus dunnii* Maiden stand in sandy soil. **Revista Árvore**. v.40, n.6, p: 1051-1058, 2016.

MACEDO, R.L.G. et al. A. F. Plasticidade Ecofisiológica. In: VALE, A.B. et al. **Eucaliptocultura no Brasil: Silvicultura, manejo e ambiência.** Editora UFV, 1ed, Viçosa, MG, SIF. 2014. 551 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Editora Agronômica Ceres Ltda, São Paulo, 2006. 638p.

MALUF, H.J.G.M. et al. Disponibilidade e recuperação de nutrientes de resíduos culturais em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.39, p:1690-1702, 2015.

MALYSZ, M. et al. Desinfestação e micropropagação de *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Perspectiva,** v.35, n.131, p: 69-77, 2011.

MARENCO, R.A.; LOPES, N.F. **Fisiologia vegetal**: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral. Editora UFV, 3ed. Viçosa/MG, 2009. 486p.

MARQUES, M.G. **Transformações do carbono e do nitrogênio no solo e produção de aveia com o uso de dejetos de suínos em plantio direto**. Dissertação de mestrado, PPGCS – Santa Maria, UFSM. 2005, 85p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Editora Academic Press, 2ed. Londres, 1995. 889p.

MATTIELLO, E.M. et al. Transporte de boro no solo e sua absorção por eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. vol.33, n.5, p: 1281-1290, 2009.

MELO, A.B.C. Previsão de chuvas acima da normal para o norte do Brasil. B**oletim de informações climáticas do CPTEC/INPE.** Ano 18, número 11: MCT/INPE/CPTEC, 2011.

MEURER, E. J.; RHEINHEIMER, R.D.; BISSANI, C.A. Fenômenos de sorção em solos. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Editora Evangraf LTDA, Porto Alegre, 2010. p.107-147.

MILLER, H.G. The influence of stand development on nutriente demand, growth and allocation. **Plant Soil**, v.168, 232p, 1995.

NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. Effect of aluminum in nutrient solution on growth and nutrient uptake by *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**. v.6, p: 1-16, 1982.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Potássio. In: NOVAIS, R.F.et al. eds. **Fertilidade do solo**. Editora UFV - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1ed. Viçosa/MG, 2007. p. 551-594.

NOVAIS, R.F. et al. Interpretação de análise química do solo para o crescimento e desenvolvimento de *Eucalyptus* spp.: Níveis críticos de implantação e manutenção. **Revista Árvore.** v.10, p: 105-111, 1986.

PAES, F.A.S.V. et al. Impacto do manejo dos resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.37, p: 1081-1090, 2013.

PALLARDY, S. **Physiology of woody plants**. Editora Academic Press, San Diego, 2008. 454p.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D.A. **Inventário Florestal**. Santa Maria/RS, FSM/CEPEF/FATEC, 1997. 315p.

PEREIRA, F.C.M.; YAMAUTI, M.S.; ALVES, P.L.C.A. Interação entre manejo de plantas daninhas e adubação de cobertura no crescimento inicial de *Eucalyptus grandis x E. urophylla.* **Revista Árvore**. v.36, n.5, p: 941-949, 2012.

PILLAR, V.P.; MÜLLER, S.C.; CASTILHOS, Z.M. S.; JACQUES, A.V.A. **Campos Sulinos - Conservação e Uso Sustentável da Biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. 403p.

POGGIANI, F. Ciclagem de nutrientes em Florestas do Brasil. In: MARTINS, S.V.et al. Sucessão Ecológica: Fundamentos e Aplicações na Restauração de Ecossistemas Florestais. In: MARTINS, S.V. (Org). **Ecologia de Florestas Tropicais no Brasil**. Ed.: UFV: Viçosa, MG, 2012. 371p.

POGGIANI, F.; SCHUMACHER, M.V. Atmospheric inputs compared withnutrients removed by harvesting from Eucalyptus plantations. Implications for sustainability. In: "**IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of Eucalyptus**" IUFRO/EMBRAPA. Salvador, 1997. p: 68-74.

POGGIANI, F.; SCHUMACHER, M.V. Ciclagem de nutrientes em florestas nativas. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e Fertilização Florestal**. IPEF - Piracicaba, 2005, 427p.

PRADO, R.M. **Nutrição de plantas**. São Paulo/SP, UNESP, 2008. 407p.

PRICHTETT, W. L.; FISHER, R. **Properties and management of forest soil.** Editora John Wiley & Sons, 2ed. Nova York, 1987. 488p.

RAMOS, S.J. et al. Crescimento e teores de boro em plantas de eucalipto (*Eucalyptus citriodora*) cultivadas em dois latossolos sob influência de doses de boro e disponibilidade de

água**. Revista Árvore**. v.33, n.1, p: 57-65, 2009.

REIS, A. et al. Restauração de áreas degradadas: a nucleação como base para incrementar os processos sucessionais. **Natureza & Conservação.** v.1, n.1, p: 28-36, 2003.

RESENDE, M.D.V. et al. Genética e melhoramento do eucalipto. In: VALE, A.B. et al. **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência.** Editora UFV - Viçosa, 2014. p.187-207.

RIBEIRO, M.A. et al.Resposta da soja e do eucalipto ao aumento da densidade do solo e a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.34, p: 1157-1164, 2010.

ROCHA, J.H.T. et al. Produção e desenvolvimento de mudas de eucalipto em função de doses de fósforo. **Cerne**. v.19, n.4, p: 535-543, 2013.

ROCHA, G.N.; GONÇALVES, J.L.M.; MOURA, I.M. Mudanças da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.28, p: 623-639, 2004.

ROCHA, M.P. *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria-prima para serrarias. **Tese de doutorado.** Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2000, 186p.

RODELLA. A.A.; ALCARDE, J.C. Physical and chemical requirements of mineral fertilizers. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Forestry nutrition and fertilization**. IPEF: Piracicaba, 2004. p. 13-64.

SALVADOR, S.M. et al. Biomassa e estoque de nutrientes em plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith. em diferentes idades. **Scientia Forestalis.** v.44, n. 110, p: 311-321, 2016.

SANTANA, R. C.; FONTAN, I. C. I.; OLIVEIRA, S. L. Implantação, manutenção e produtividade dos povoamentos. In: VALE, A. B.et al. **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência.** Editora UFV: Viçosa, 2014. p: 187-207.

SANTANA, R. C. et al. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.32, p: 2723-2733, 2008.

SCHUMACHER, M.V.; VIERA, M. Ciclagem de nutrientes em plantações de eucalipto. In: SCHUMACHER, M.V.; VIERA, M. **Silvicultura do Eucalipto no Brasil**. Editora UFSM, Santa Maria, 2015. 308p.

SCHUMACHER, M.V. et al. Aporte de cátions através da deposição atmosférica em uma floresta secundária de Itaara. In: SCHUMACHER, M.V. et al. (eds). A Floresta Estacional Subtropical: caracterização e ecologia no rebordo do Planalto Meridional. Santa Maria, 2011, 320p.

SCHUMACHER, M. V. Aspectos da ciclagem de nutrientes e do microclima em talhões de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden e *Eucalyptus torelliana* F. Muell. **Dissertação de Mestrado**. Piracicaba. 1992. 87 p.

SETTE JR, C.R. et al. Crescimento em diâmetro do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill. ex. Maiden e relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. **Revista Árvore**, v.34, n.6, p: 979-990, 2010.

SGARBI, F. et al. Avaliação do estado nutricional e da fertilidade do solo em plantios de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* na região de Capão Bonito/SP. In: 25ª Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. **Anais...** Fertbio: Santa Maria, 2000a.

_____. Avaliação do estado nutricional e da fertilidade do solo em plantio de *Eucalyptus* na região de Lençóis Paulista/SP. In: 25ª Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. **Anais...** Fertbio: Santa Maria, 2000b.

SGARBI, F. **Produtividade do *Eucalyptus* sp. em função do estado nutricional e da fertilidade do solo em diferentes regiões do estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Piracicaba, SP; 114p, 2002.

SHEN, W. et al. Atmospheric deposition and canopy exchange of anions and cations in two plantation forests under acid rain influence. **Atmospheric Environment**. v.64, p: 242-250, 2013.

SILVA, F. de A.S. e.; AZEVEDO, C.A.V. de. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research.** v.11, n.39, p: 3733-3740, 2016.

SILVA, P.H.M. et al. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**. v.301, p: 67–78, 2013.

SILVA, I.R; MENDONÇA. E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.et al. eds. **Fertilidade do solo**. 1ª ed. Viçosa/MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.275-374.

SILVA, S.R. et al. Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.26, p: 1001-1010, 2002.

SILVEIRA, R.L.V.A. et al. Evaluation of the nutritional status of eucalyptus: visual and foliar diagnosis and theis interpretations. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (org). **Forest Nutrition and fertilization.** 2. Ed. Piracicaba, SP: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2004, p. 85 - 112.

_____. Avaliação do estado nutricional de clones de *Eucalyptus* na região da Bahia. In: 25ª Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. **Anais...** Fertbio: Santa Maria, 2000.

SIMONETE, M.A. et al. Fornecimento de cálcio para plantas de *Eucalyptus saligna* por meio de aplicação de resíduo industrial lama de cal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.37, p: 1343-1351, 2013.

SINGER, A. et al. Throughfall deposition of sulfur to a mixed oak and pine forest in Israel. **Atmospheric Environment**. v.30, n.22, p: 3881-3889, 1996.

STAPE, J.L. et al. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management.** v.259, p: 1684–1694, 2010.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal Eucalyptus plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management.** v.255, p: 920–930, 2008.

STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. Porto Alegre/RS, EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222p.

SWITZER, G.L.; NELSON, L.E. Nutrient accumulation and cycling in Loblolly Pine (*Pinus taeda*) plantation ecosystems: The first 20 years. **Soil Science Society of America Proceedings.** v.36, p: 143-147, 1972.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Editora Artmed, 5ed. Porto Alegre, 2013.

TEDESCO, M.J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2ed. Porto Alegre, UFRGS, 1995. 174p.

TEIXEIRA, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; JUNIOR, J.C.A. Crescimento e partição de matéria seca de mudas de eucalipto em função da adubação potássica e água do solo. **Ceres**. v.53, n.310, p: 662-671, 2006.

TURGUILHO, P.F. et al. Estimativa de carbono fixado na madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. **Cerne**. v.16, Suplemento, p: 33-40, 2010.

TURNER, J.; LAMBERT, M.J. Nutrient cycling in age sequences of two *Eucalyptus* plantation species. **Forest Ecology and Management.** v.255, p: 1701–1712, 2008.

VENTURIN, N. et al. **Eucaliptocultura no Brasil: Silvicultura, manejo e ambiência.** Viçosa, MG, SIF. 2014. 551p.

VERDUM, R. STRECK, E.V.; VIEIRA, L.F.S. Degradação dos solos no Rio Grande do Sul. In: GUERRA, A.J.T.; JORGE, M.C.O. **Degradação dos solos no Brasil**. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2014. p. 87-125.

VIERA, M. et al. Biomass and nutrient allocation to aboveground components in fertilized *Eucalyptus saligna* and *E. urograndis* plantations. **New Forests**. v.48, p: 445–462, 2017.

_____. Biomassa e nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus*, em Eldorado do Sul-RS. **Ecologia e Nutrição Florestal**. v.1, n.1, p: 1-13, 2013a.

_____. Teores de nutrientes em povoamentos monoespecíficos e mistos de *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mearnsii* em sistema agrossilvicultural. **Ciência Florestal**. v.23, n.1, p: 67-76, 2013b.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M.V.; CALDEIRA, M.V.W. Biomassa e exportação de nutrientes pela colheita do eucalipto. In: SCHUMACHER, M.V.; VIERA, M. **Silvicultura do Eucalipto no Brasil.** Editora UFSM, Santa Maria, 2015. 308p.

WADT, P.G.S. Nutritional status of *Eucalyptus grandis* clones evaluated by critical level and DRIS methods. **Revista Árvore**. v.28, n.1, p: 15-20, 2004.

WADT, P.G.S. et al. Variações no estado nutricional de eucaliptos por influência do material genético e da idade da árvore. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** v.34, n.10, p: 1797-1803, 1999.

WALLING, D. E. Water in the catchment ecosystem. In: GROWER, A. M. Ed. **Water quality in catchment ecosystem**. Editora John Wiley & Sons, Chichester, 1980, p. 1-47.

WANG, M.C.; LIU, C.P.; SHEU, B.H. Characterization of organic matter in rainfall, throughfall, stemflow, and streamwater from three subtropical forest ecosystems. **Journal of Hydrology**, v.289, p: 275–285, 2004.

WARING, R.H. SCHLESINGER, W.H**. Forest Ecosystems: concepts and management**. Editoa Academic Press, 3ed, Nova York, 1985, 340p.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C.L. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. **Forest Ecology and Management**. v.193, p: 113-140, 2004.

WU, D. et al. The influence of dust events on precipitation acidity in China**. Atmospheric Environment.** v.79, p: 138-146, 2013.

ZAIA, F.C.; GAMA-RODRIGUES, A.C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.28, p: 843-852, 2004.

ZAKIA, M.J.B.; POGGIANI, F.; COUTO, H.T.Z. Correlação entre a concentração de nutrientes nas copas e a altura das árvores de eucalipto plantadas em povoamentos puros. **IPEF**, n.25, p: 29-32, 1983.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Procedimentos para coleta da biomassa das árvores de *Eucalyptus dunnii*

1) Seccionamento das árvores de DAP médio

2) Componentes fracionados (folhas, galhos, madeira do tronco e casca do tronco

3) Pesagem de galhos

4) Pesagem da madeira do tronco

5) Amostras de madeira do tronco em três posições de coleta

6) Amostragem da casca do tronco

APÊNDICE B - Parâmetros da Anova e teste Tukey aplicado para detecção de contrastes ente as médias de volume individual por árvore (m^3 árv.$^{-1}$) em função das recomendações de fertilizante (ASSISTAT)

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	2	0.00786	0.00393	3.7990 *
Resíduo	205	0.21210	0.00103	
Total	207	0.21996		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
ns não significativo (p >= .05)

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento			
T1	0.09316 b	nr =	71
T2	0.10527 ab	nr =	73
T3	0.10695 a	nr =	64

Onde: T1 = 150 g; T2 = 225 g; T3 = 450 g de N-P_2O_5-K_2O 24:00:24 por planta, respectivamente

APÊNDICE C - Transformações dos dados de concentração dos nutrientes na precipitação pluviométrica incidente e pressupostos para análise estatística (ASSISTAT)

	Shapiro-Wilk			Bartlett		
Transformação	Valor	p-Valor	Normal	Valor X^2	V crítico 5%	Homogênea
log (N)	0,9554	0,1171	Sim	2,67	19,67	Sim
log (S -SO_4^{2-})	0,9594	0,2500	Sim	11,86	18,30	Sim
log (K^+)	0,9466	0,1000	Sim	15,07	18,31	Sim
log (Ca^{2+})	0,9791	0,7591	Sim	7,59	18,31	Sim
log(Mg^{2+})	0,7892	0,00002	Não	16,54	18,30	Sim