

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

ANÍBAL DEBONI NETO

Sazonalidade do crescimento de um plantio clonal de eucalipto em solo tratado com lodo de esgoto complementado ou não com adubo mineral contendo fósforo e boro

Piracicaba

2018

ANÍBAL DEBONI NETO

Sazonalidade do crescimento de um plantio clonal de eucalipto em solo tratado com lodo de esgoto complementado ou não com adubo mineral contendo fósforo e boro

Dissertação apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Cassio Hamilton Abreu Junior

Piracicaba

2018

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Técnica de Biblioteca – CENA/USP

Deboni Neto, Aníbal

Sazonalidade do crescimento de um plantio clonal de eucalipto em solo tratado com lodo de esgoto complementado ou não com adubo mineral contendo fósforo e boro / Aníbal Deboni Neto; orientador Cassio Hamilton Abreu Junior. - - Piracicaba, 2018.

54 p. : il.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Adubos 2. Agrometeorologia 3. Dendrometria 4. Ecofisiologia vegetal
5. Fertilizantes fosfatados 6. Reciclagem de resíduos urbanos 7. Solo florestal
I. Título.

CDU 631.879.2 : 630*11

Elaborada por:

Marília Ribeiro Garcia Henyei

CRB-8/3631

Resolução CFB Nº 184 de 29 de setembro de 2017

- Gatinho de Cheshire [...] poderia me dizer, por favor, que caminho devo tomar a partir daqui?
- Depende bastante para onde quer ir, respondeu o Gato.
- Não me importa muito para onde, disse Alice.
- Então não importa que caminho tome, disse o Gato.
- Contanto que eu chegue a algum lugar, Alice acrescentou como explicação.
- Oh, isso você certamente vai conseguir, afirmou o Gato, desde que ande o bastante.

Lewis Carrol. As aventuras de Alice no país das maravilhas.

AGRADECIMENTOS

Ao povo brasileiro, que através de seus impostos possibilitou que o CNPQ (Processo 485205/2012-2) financiasse a bolsa de mestrado ao longo desses dois anos.

Ao CENA, pela excelente infraestrutura e especialmente ao setor de transportes, nas figuras do Sr. Luís e Sr. Cláudio, por todo apoio e compreensão nas inúmeras viagens de campo ao longo deste trabalho.

À Suzano Papel e Celulose, em especial a Dileto Benedito Baú, Clayton Alcarde Alvares e José Luiz Stape, por todo apoio técnico e fornecimento de informações.

Ao Prof. Mario Tomasiello e ao Sr. Aparecido Candido Siqueira por todo apoio na realização deste trabalho

Ao Prof. Cassio Hamilton Abreu Junior pela oportunidade e aprendizado.

A Júlia Ramos Nardy, por ser a namorada mais dedicada do mundo e ter sido tão compreensiva em todos os momentos estressantes nesses anos.

Ao Thomas Gamper Feitosa pela amizade e inestimável ajuda nas coletas de dados.

Ao Eduardo Moré Mattos por todas as contribuições ao desenvolvimento deste trabalho.

À Dayana Rodrigues, estagiária e que tantas vezes foi ao campo para me ajudar.

Aos amigos Joaquim (Jota), Marcelo, Felipe (castanho), João (lennon) e Pedrão pelos momentos de descontração e discussões acadêmicas.

RESUMO

DEBONI-NETO, A. **Sazonalidade do crescimento de um plantio clonal de eucalipto em solo tratado com lodo de esgoto complementado ou não com adubo mineral contendo fósforo e boro.** 2018. 54 p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

O uso do lodo de esgoto (LE) em solos florestais é uma alternativa para disposição deste resíduo com possibilidade de ganhos de produtividade e redução do consumo de fertilizantes minerais, tendo seu uso regulamentado pela Resolução CONAMA 375/2006. Objetivou-se, com este trabalho, caracterizar a sazonalidade do crescimento de um plantio de eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto complementado ou não com adubo contendo fósforo e boro e sua respectiva resposta as variáveis meteorológicas. Para tanto foi instalado um experimento, utilizando um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, em blocos ao acaso (DBC) com dez tratamentos em um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico espessarênico, no Município de Boa Esperança do Sul – SP, em uma área de produção comercial da empresa Suzano Papel e Celulose. Os tratamentos foram: um controle, duas recomendações de adubação exclusivamente mineral e sete tratamentos contendo três doses de lodo, duas doses de fósforo e a adição ou não de boro. As doses de lodo, corresponderam a 14,5 29 e 43,5 Mg ha⁻¹; fósforo a 40 e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅; boro a 6,5 kg ha⁻¹ via ulexita; potássio a uma dose de 165 kg ha⁻¹ de K₂O. Ao longo de 12 meses, no período de 23 a 35 meses após o plantio, o crescimento foi monitorado quinzenalmente com o uso de dendrômetros de banda, também foram realizados inventários dendrométricos semestrais e um inventário destrutivo para ajuste das equações. O tratamento LE50+P83-B+K (T9) apresentou maior produtividade, no entanto não houve diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos devido ao forte déficit hídrico observado ao longo do estudo. O incremento em volume das árvores variou ao longo do ano sendo influenciado pelas condições meteorológicas sem que, no entanto, o padrão de resposta tenha sido alterado pelos tratamentos.

Palavras-chave: Eucalipto. Crescimento sazonal. Lodo de esgoto.

ABSTRACT

DEBONI-NETO, A. **Seasonal growth of a clonal eucalyptus plantation on a soil amended with sewage sludge supplemented or not with mineral fertilizer containing phosphorus and boron.** 2018. 54 p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

The use of sewage sludge (LE) in forest soils is an alternative for disposal of this residue with the possibility of productivity gains and reduction of the consumption of mineral fertilizers, its use is regulated by Resolution CONAMA n.º 375/2006. The objective of this research was to characterize the seasonality of the growth of a eucalyptus plantation as a function of the application of sewage sludge supplemented or not with fertilizer containing phosphorus and boron and its respective response to meteorological variables. For this purpose, an experiment was carried out using a hybrid of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, in a randomized block design (DBC) with ten treatments in a sandy Oxisol, in the Municipality of Boa Esperança do Sul - SP, in a production land of the company Suzano Papel e Celulose. The treatments were: one control, two recommendations of exclusively mineral fertilization and seven treatments containing three doses of sludge, two doses of phosphorus and the addition or not of boron. The sludge doses corresponded to 14.5, 29 and 43.5 Mg ha⁻¹; phosphorus at 40 and 50 kg ha⁻¹ of P₂O₅; boron at 6.5 kg ha⁻¹ via ulexite; potassium at a dose of 165 kg ha⁻¹ of K₂O. During 12 months, in the period between 23 and 35 months after planting, growth was monitored biweekly with the use of band dendrometers, semiannual dendrometric inventories were also performed, and a biomass inventory was used to adjust the equations. Treatment LE50+P83-B+K (T9) presented higher productivity, however there was no statistically significant difference between treatments due to the strong water deficit observed throughout the study. The increase in volume of the trees varied throughout the year being influenced by the meteorological conditions, however, the pattern of response was not altered by the treatments.

Key-words: Eucalyptus. Seasonal growth. Sewage sludge.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1 Silvicultura no Brasil	14
2.2 Esgotamento sanitário no Brasil e produção de lodo de esgoto.....	14
2.3. Reciclagem agrícola do LE.....	16
2.4 Aplicação de LE em plantações de Eucalipto	17
2.5 Monitoramento do crescimento e influência climática	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 Área experimental	21
3.1.1 Clima	21
3.1.2. Solo	22
3.2. Delineamento experimental.....	24
3.2.1 Caracterização do LE	24
3.2.2 Tratamentos	25
3.2.3 Implantação do experimento	28
3.3 Monitoramento do crescimento das árvores.....	29
3.3.1 Inventário dendrométrico.....	29
3.3.2 Inventário destrutivo	29
3.3.2.1 Biomassa do fuste com casca.....	30
3.3.2.2 Biomassa de folhas	30
3.3.2.3 Área foliar	31
3.3.2.4 Volume do fuste com casca.....	31
3.3.3 Monitoramento quinzenal do incremento.....	32
3.4 Monitoramento meteorológico	34
3.5 Forma de análise dos resultados	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 Estoque de madeira	37
4.2 Biomassa.....	40
4.2 Monitoramento quinzenal do crescimento	42
5. CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

O adensamento populacional em áreas urbanas leva ao decaimento da qualidade das águas superficiais, quando há lançamento de esgotos sanitários sem tratamento. Tradicionalmente a solução adotada para reversão desse quadro tem sido a coleta e o tratamento dos efluentes.

A média brasileira para coleta de esgoto é de 55,17% e tratamento de cerca de 74%. Do tratamento do esgoto obtém-se o lodo esgoto que representa a fração sólida do efluente e que é retirada durante o tratamento. A expansão da rede de coleta e tratamento leva ao aumento da produção desse resíduo, se por um lado temos a solução para o problema da poluição das águas, por outro temos um novo problema relativo à destinação do resíduo.

Ao longo da história humana existem diversos registros sobre a utilização de efluentes como forma de adubação de campos agrícolas. Na Europa, desde o século XIX, tem-se implementado projetos que o utilizam como fonte de nutrientes.

As pesquisas acerca da aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas mostram que a sua disposição acarreta na adição de uma série de substâncias capazes de alterar as propriedades físicas, químicas e biológicas. De maneira geral, afetam positivamente o crescimento das plantas.

A composição do lodo, apesar de variável, é bastante rica em matéria orgânica, nitrogênio e fósforo. Em se tratando de solos tropicais, o lodo de esgoto é bastante interessante, pois se tratando de solos muito intemperizados, são pobres em matéria orgânica e em nutrientes, com destaque para a deficiência de fósforo.

Diante do exposto, a aplicação deste tipo de resíduo nas florestas plantadas aparece como uma alternativa viável, uma vez que não se destina ao consumo humano e possui alto grau de mecanização de suas atividades, o que evita rotas de exposição dos trabalhadores aos possíveis agentes patogênicos que o lodo de esgoto possa conter, garantindo assim a segurança do trabalhador rural e do ambiente. Além disso, a longa rotação das florestas, quando comparadas as culturas agrícolas, limita a quantidade aplicada e evita possíveis contaminação do solo por metais pesados.

O presente estudo teve como objetivo estudar como a aplicação de lodo esgoto, complementado ou não com adubo mineral contendo fósforo e boro, altera o crescimento das árvores em resposta as variáveis meteorológicas, em comparação com o manejo da adubação mineral do plantio florestal.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Silvicultura no Brasil

Dados referentes ao ano de 2016 dão conta que o segmento de florestas plantadas ocupa uma área de cerca de 7,84 milhões de hectares, destes, 5,7 milhões são ocupados com plantações de espécies do gênero *Eucalyptus*. Três estados possuem mais da metade da área cultivada no país, sendo Minas Gerais (25%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (15%). Cabe destacar que no período 2015-2016 o estado de Mato Grosso do Sul ampliou a área plantada em 400 mil hectares, com uma taxa média de crescimento de 13% ao ano, o que coloca este estado como principal área de expansão da silvicultura de eucalipto no país. (IBA, 2017).

No âmbito econômico o setor tem sofrido com a profunda crise que assola a economia nacional. O PIB setorial atingiu, em 2016, R\$ 71,1 bilhões, cerca de 1,1% do PIB Nacional, com redução de 3,3% em relação ao ano anterior. Ainda que importante, a redução no setor florestal foi menor que o observado em outros setores.

Ao longo do período 1970 a 2000 a silvicultura do eucalipto apresentou forte incremento de sua produtividade passando de cerca de $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, o que possibilitou ao Brasil galgar a posição de campeão mundial de crescimento do eucalipto. O aumento crescente observado no período se deveu principalmente a melhorias obtidas na seleção de materiais genéticos, melhoria e adequação dos tratamentos culturais e ações de proteção (HAKAMADA, 2012). Apesar disso, nos últimos anos, a produtividade vem diminuindo, sendo em torno de $35,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em 2016. O resultado mais modesto tem sido atribuído a alterações do regime de chuvas, em decorrência das mudanças climáticas, como também pela expansão das áreas de plantios para novas regiões (IBA, 2017).

2.2 Esgotamento sanitário no Brasil e produção de lodo de esgoto

O adensamento da população brasileira em centros urbanos foi crescente ao longo de todo século XX, especialmente nas décadas de 1970 e 1980 quando observou-se intenso processo de êxodo rural. No ano de 2015, a nível nacional,

o país possuía 84,72% de sua população vivendo em cidades face a 15,28% de habitantes nas zonas rurais. Na região Sudeste, a mais urbanizada, 93,14% da população está nos centros urbanos (IBGE, 2018).

A urbanização brasileira tem sido, historicamente, um processo desorganizado. Isso traz consigo a poluição dos corpos d'água e a deterioração da qualidade de vida (TUCCI, 2008). A principal medida tomada de forma a garantir a preservação dos cursos d'água tem sido a coleta e tratamento dos efluentes. Dados obtidos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento dão conta que, na média, o Brasil coleta 55,17% do esgoto e trata cerca de 74%, no entanto existe uma grande disparidade entre as regiões brasileiras. Um olhar mais detalhado revela que o Estado do Pará, pior colocado, coleta apenas 5,4% do esgoto, tratando míseros 16,48%, enquanto o Distrito Federal, em primeiro lugar nos índices, coleta 82,2% com 100% de esgoto tratado (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO DE SANEAMENTO, 2016).

Esgoto é o nome usualmente dado aos despejos provenientes do uso das águas, quer queira com fins comerciais, domésticos, industriais, agrícolas e outros efluentes sanitários. O esgoto doméstico é composto por mais de 99,9% de água e 0,1% de sólidos. Ainda que represente uma fração diminuta, os sólidos são responsáveis pelas qualidades físicas, químicas e biológicas próprias ao esgoto sanitário. A fração sólida é composta por 70% material orgânico (proteínas, carboidratos, lipídeos e microrganismos) e 30% material inorgânico (areia, sais e metais) (BERTON; NOGUEIRA, 2010; SOBRINHO, 2002).

Com o tratamento do esgoto objetiva-se a remoção de material orgânico e inorgânico, estando ele dissolvido ou em suspensão no esgoto. Para tanto, as estações de tratamento de esgoto (ETE) empregam um processo sequencial para remoção dos sólidos de acordo com sua facilidade de remoção. Sobrinho (2002) pontua que a sequência do tratamento prevê a remoção de 1) sólidos grosseiros e areia 2) sólidos sedimentáveis 3) sólidos em suspensão e matéria coloidal 4) matéria orgânica biodegradável (tratamentos aeróbios e anaeróbios). O resíduo gerado em cada umas das fases é o que denominamos lodo de esgoto (LE).

Até este momento o LE ainda contém muita água e necessitará ser desaguado. Os processos de desaguamento podem ser a) naturais: leitos e lagoas de secagem b) mecânicos: centrífugas, filtro prensa de esteiras ou placas.

Essa operação é importante, pois visa reduzir os custos com transporte, facilitar a manipulação bem como melhorar a eficiência da destinação posterior do LE, seja a compostagem, a incineração ou o aterramento (MIKI et al., 2002).

O aumento da cobertura da rede de coleta e tratamento de esgoto traz consigo a melhoria da qualidade das águas devolvidas aos rios, mas também traz um novo problema, a produção de LE aumenta junto com a oferta desse serviço. Estima-se que para cada 10.000 m³ de efluente que recebem tratamento, gera-se 15 toneladas de LE, podendo esse valor sofrer variação em função do tipo de tratamento utilizado (ANDRADE, 2014).

O aspecto da destinação do LE tem sido muitas vezes negligenciado na gestão das ETE, os destinos mais comuns para esse material são: aterramento sanitário, reuso industrial, incineração, conversão em óleo combustível, recuperação de solos além do uso agrícola e florestal. Os custos com a destinação do LE podem chegar a 50% do custo operacional de uma ETE (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

2.3. Reciclagem agrícola do LE

A utilização de dejetos para melhoria das propriedades do solo é muito antiga. Descobertas recentes dão conta que os índios da região amazônica produziam solos férteis, conhecidos como terra preta de índio, a partir da utilização de resíduos fecais e material vegetal cerca de 7000 anos atrás (FACTURA et al., 2010). Mais recentemente, durante o século XIX, a Inglaterra desenvolveu projetos de utilização de esgotos na agricultura, tanto como forma de tratar esgotos (*sewage-farms*), como pela redução de custos com fertilizantes importados (BOYD, 1957; GODDARD, 1996).

O LE apresenta composição bastante variável. As características apresentadas pelos LE estão relacionadas a origem do esgoto, se é doméstico ou industrial, ao tipo de tratamento utilizado na ETE, a época do ano, ao tratamento feito ao LE. Dados da ETE-BARUERI obtidos por Berton e Nogueira (2010), em que o LE foi amostrado em quatro períodos ao longo dos anos de 2007 e 2008, tomando como exemplo o elemento Al, sua concentração variou de 1515 mg kg⁻¹ em outubro/2007 para 16707 mg kg⁻¹ em Janeiro/2008. A variação sazonal pode ser observada para os outros elementos analisados.

Ainda que variável, os componentes do LE podem ser de grande interesse agrônomo. O LE contém grande quantidade de matéria orgânica (40%), quantidades significativas de micro e macronutrientes, com destaque ao N e P, com 4% e 2%, respectivamente, além de funcionar como condicionador de solo (BETTIOL; CAMARGO, 2006; ALVARENGA, 2015).

Os benefícios potenciais oferecidos pelos nutrientes presentes no LE devem ser balanceados, pois, além deles, o LE possui microrganismos como bactérias e vírus, muitos deles patogênicos aos humanos (CABARET et al., 2002; RIMHANEN-FINNE et al., 2004). Outro problema associado ao uso de LE é que são elementos inorgânicos potencialmente tóxicos (também chamados de metais-pesados) tais como As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se e Zn.

Para possibilitar maior segurança na utilização do LE na agricultura, em 2006, foi publicada a resolução CONAMA n.º 375 que estabelece critérios para sua utilização, bem como os procedimentos para sua distribuição (BRASIL, 2006). A legislação proíbe o uso do LE em pastagens, culturas inundadas, cultivos olerícolas, tubérculos e raízes e para qualquer cultura cuja parte comestível esteja em contato direto com o solo. Também define limite de ocorrência no LE para os elementos potencialmente tóxicos (orgânicos e inorgânicos) e microrganismos.

Em face dessa problemática, o uso de LE em plantios florestais para produção de celulose e papel torna-se atraente. Os produtos originados da madeira não se destinam à alimentação humana ou animal, possibilitando uma maior segurança quanto à dispersão dos eventuais contaminantes, presentes no LE, na cadeia alimentar (FIRME, 2009; ABREU JUNIOR, 2009, FERRAZ; POGGIANI, 2014). Cada ciclo de cultivo do eucalipto, quando manejado para produção de papel e celulose, gira em torno de 7 anos, sendo a aplicação de LE realizada na implantação no cultivo, dessa maneira também evita-se o problema da superaplicação de LE que pode levar a contaminação do solo (BETTIOL; GHINI, 2011).

2.4 Aplicação de LE em plantações de eucalipto

Pesquisas desenvolvidas sobre a utilização do LE em plantações florestais têm demonstrado sua viabilidade. Os resultados apontam sua capacidade fertilizante e condicionadora de solo, com possibilidades de ganho ao produtor, tanto pelo aumento da produtividade como pela redução da necessidade de fertilizantes

minerais. É possível, também, resolver o problema da destinação dos resíduos da ETE através de uma solução adequada e mais econômica.

Laclau, Gonçalves e Ranger (2017) em um experimento com *Eucalyptus grandis* conduzido em Latossolo com aplicação de 30 Mg ha⁻¹ (base seca) de LE verificaram que o desenvolvimento radicular acelerado da espécie, chegando a mais de 6 m no primeiro ano de crescimento aliada à grande demanda por água e nutrientes fizeram com que a lixiviação de nutrientes não chegasse a 3 m e assim concluíram que a utilização de LE em plantações de eucalipto não representa risco de contaminação das águas subterrâneas.

Em outro experimento, também em um Latossolo, foi testada a interação de doses crescentes de LE, nas proporções 0, 8,15 e 23 Mg ha⁻¹ (base seca), com N e P. Abreu Junior et al. (2017) verificaram que o uso de LE pode substituir em 100% as necessidades de N e P. Além disso, com o uso de 2/3 da dose recomendada de P obteve-se uma produção de madeira 7% maior.

Dada a variabilidade entre os LE, Ferraz, Momentel e Poggiani (2016), utilizando LE de três diferentes ETE: Barueri, São Miguel e Parque Novo Mundo, todas localizadas na região metropolitana de São Paulo, aplicando 15 Mg ha⁻¹ de LE comparado a um tratamento com adubação mineral e outro controle, observaram que i) os três lodos propiciaram o aumento dos teores de matéria orgânica, P, N, S, Cu e Zn na camada 0-5 cm de profundidade do solo ii) os LE tratados com polieletrólitos (ETE Barueri e São Miguel) obtiveram a mesma produtividade (m³ ha⁻¹ ano⁻¹) quando comparados a adubação mineral iii) o LE da ETE Pq. Novo Mundo continha alto teor de Ca, por ter sido caleado, e que poderia induzir deficiência de K e Mg pelo aumento da concentração daquele nutriente nas folhas.

Rocha; Gonçalves e Moura (2004), estudando o efeito de doses crescentes (de 0 a 40 Mg ha⁻¹) de LE sobre a fertilidade do solo e o crescimento de *E. grandis* aos 12, 24 e 36 meses, notaram houve aumento gradual na fertilidade do solo com aumento dos teores de matéria orgânica, P-resina e Ca trocável. Os autores também determinaram que com uma dose de 12 Mg ha⁻¹ era possível obter a mesma produtividade que a adubação mineral. O efeito progressivo e gradual da liberação de nutrientes pelo LE já havia sido observado por Poggiani, Guedes e Benedetti (2005).

Em um experimento realizado por Firme (2009) e Abreu-Junior et al. (2017), estudando diferentes doses de LE, adubo fosfato e nitrogenado encontraram que o LE poderia suprir a necessidade de nitrogênio da cultura e quando combinado com adubo fosfatado apresentava produtividade superior a adubação mineral e aplicação de LE separadamente, sem que, no entanto, tenham sido conclusivos sobre qual dose de P seria melhor.

2.5 Monitoramento do crescimento e influência climática

A variabilidade das variáveis meteorológicas, bem como sua intensidade, ao longo do tempo afeta diretamente o crescimento. Landsberg (2003) pontua que a radiação solar é a fonte de energia para os processos de transpiração e evaporação. A temperatura do ar afeta o déficit de pressão de vapor e, conseqüentemente, a relação entre a câmara estomática e a atmosfera que associado a umidade do solo regulam o processo de difusão de vapor d'água entre os estômatos e a atmosfera.

O monitoramento permanente do incremento em diâmetro das árvores permite correlacionar variáveis ambientais ao desenvolvimento da planta, em função dos estresses climáticos, da adubação e do manejo (MATTOS, 2015; FIDELES, 2016; MOMENTEL, 2016). Os dendrômetros de banda de aço são uma opção de baixo custo, facilidade de construção e alta precisão que permitem o monitoramento do crescimento radial de árvores num reduzido intervalo de tempo (CASTRO et al., 2017; BOTOSSO; TOMAZELLO FILHO, 2001).

A utilização desta metodologia no monitoramento de árvores de eucalipto tem demonstrado que a sazonalidade do crescimento em diâmetro é influenciada tanto pela adubação como pelas variáveis ambientais. Sette Junior et al. (2010) observaram que o déficit de pressão de vapor foi a variável climática que mais influenciou no crescimento das plantas e que os efeitos da variação podiam ser mais bem compreendidos num período de defasagem (*lag*) de 28 dias.

Sette Junior (2012), utilizando dendrômetros de banda em um experimento de adubação comparando a aplicação de LE com adubação nitrogenada, encontrou forte influência das variáveis meteorológicas na sazonalidade do crescimento das árvores e também que o incremento proporcionado pelo LE foi superior ao da adubação mineral.

A compreensão do papel da variabilidade meteorológica no crescimento das árvores é essencial para manutenção dos níveis de produtividade atuais e também possibilita a predição do impacto potencial das mudanças climáticas em cenários futuros. A variabilidade climatológica intranual é de suma importância para identificação de variáveis e na forma como sua amplitude afeta o crescimento em determinados períodos do ano (RAWAL et al., 2014; CAPOE et al., 2016).

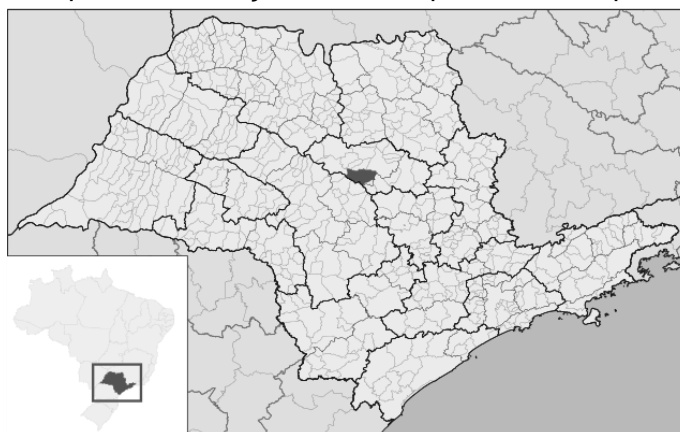
A variável meteorológica de maior importância no crescimento das árvores depende da região climática onde está inserida. Via de regra, árvores que crescerão em ambientes secos, onde há forte restrição hídrica terão o crescimento principalmente afetado pela distribuição das chuvas ao longo do ano de ao déficit de pressão de vapor (STAPE et al., 2010; ROWLAND et al., 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área experimental

Localizada no município de Boa Esperança do Sul (Figura 1), na região central do Estado de São Paulo, encontra-se a Fazenda Flecha Azul, de propriedade da empresa Suzano Papel e Celulose S.A. e que, anteriormente, pertencia a empresa Ripasa. Os solos da fazenda têm sido cultivados com eucaliptos há mais de 40 anos. O local foi escolhido por nunca ter recebido aplicação de lodo e, portanto, não apresentar efeito residual.

Figura 1 – Mapa de localização do Município de Boa Esperança do Sul

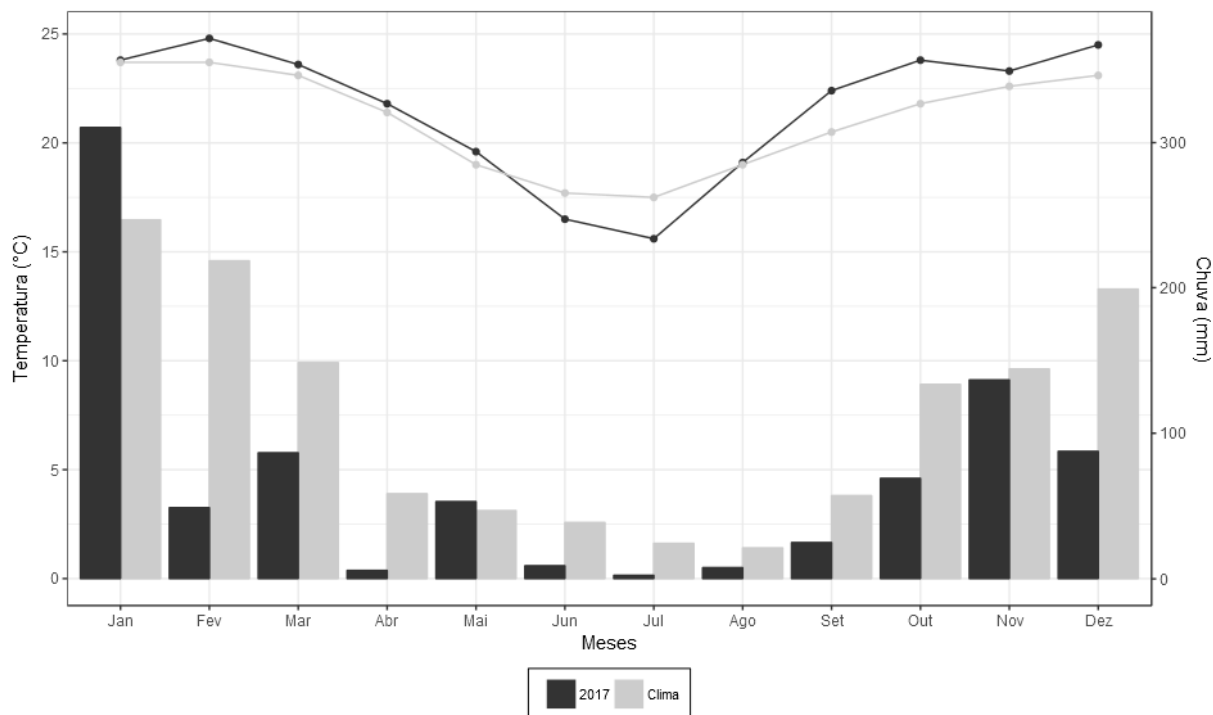


Fonte: Wikipédia

3.1.1 Clima

O Município de Boa Esperança do Sul, localizado a uma latitude $21^{\circ}59'33''$ S e a uma longitude $48^{\circ}23'27''$ O, apresenta, altitude média de 490 m, temperatura média anual de $21,7^{\circ}$ e precipitação anual de 1338 mm, com clima do tipo Cwa, de acordo com a classificação de Koeppen (ALVARES et al., 2013). Os dados da normal climatológica do município e os valores observados para o ano de 2017 estão expressos na Figura 2. Nota-se que, no geral, este foi um ano mais extremo, com anomalia positiva da temperatura nos meses mais quentes e negativa nos meses mais frios. É possível observar, também, que se tratou de um ano mais seco em relação à média histórica.

Figura 2 – Normal climatológica do município de Boa Esperança do Sul - SP e valores observados na estação meteorológica da Fazenda Flecha Azul no ano de 2017



Fonte: o autor

3.1.2. Solo

A gleba do plantio está situada em região de relevo suave, cujos solos compreendem uma topossequência de três Latossolos, a saber:

- **LVd4:** Parte alta – LATOSSOLO VERMELHO; distrófico típico, A moderado, textura média leve, fase relevo suave ondulado
- **LVAd1:** Porção média, local do experimento – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO; distrófico espessarênico, A moderado, textura média leve, fase relevo plano ou suave ondulado
- **LVAd2:** Parte baixa – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO; distrófico típico, A moderado, textura média leve, fase relevo plano ou suave ondulado

A área experimental está localizada sobre a mancha de LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico espessarênico.

Em momento anterior a instalação do experimento, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0 – 10 cm, 10 – 20 cm e 20 – 40 cm profundidade para a caracterização física e da fertilidade do solo da área experimental. As amostras foram homogeneizadas, secas ao ar, peneiradas e enviadas para análise no

laboratório do Departamento de Ciências do Solo da ESALQ/USP. As análises de fertilidade seguiram as recomendações de Raij et al. (2001), o pH foi determinado em cloreto de cálcio a $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ (CaCl_2), matéria orgânica (MO) pela oxidação com dicromato de potássio, fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{++}) e magnésio (Mg^{++}) extraídos pela resina trocadora de íons, enxofre na forma de sulfato (S-SO_4), além dos micronutrientes: cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) extraídos com complexante DTPA, e boro (B) extraído com uma solução de BaCl_2 . A partir dos resultados, foram calculados a soma de bases (SB), alumínio trocável (Al^{3+}), acidez total pela solução SMP (H+Al). Os resultados das análises químicas podem ser encontrados na Tabela 1, a caracterização granulométrica na Tabela 2.

Tabela 1– Caracterização da fertilidade do solo da área experimental

Prof.	pH	M.O.	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B	P_{res}	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S.B.	CTC	V	m
cm	CaCl_2	g dm^{-3}			mg dm^{-3}								$\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$				%	
0-10	6,1	9,0	5,8	0,4	31,6	1,1	4,1	0,4	5,3	0,6	23,5	2,5	14,5	0,0	27,0	41,5	65,0	0,0
10-20	5,7	7,5	2,8	0,3	35,4	0,6	2,2	0,4	3,3	0,5	16,0	2,3	15,3	0,0	19,3	34,5	54,5	0,0
20-40	4,9	3,5	5,3	0,3	27,8	0,8	0,8	0,2	2,0	0,4	9,8	1,3	18,3	0,5	11,5	29,8	38,8	4,3

Nota: MO = matéria orgânica; H+Al = Acidez trocável; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V = saturação por bases (cátions não ácidos); m = saturação por alumínio.

Tabela 2– Caracterização das frações granulométricas do solo da área experimental

Prof.	Argila	Silte	Areia Total	Areia Grossa	Areia Fina
cm	<0,002mm	0,053-0,002mm		2,00-0,210mm	0,210-0,053mm
	g kg^{-1}				
0-10	82	26	893	545	348
10-20	85	15	900	543	358
20-40	81	19	900	530	370

3.2. Delineamento experimental

As mudas clonais do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* SP5727) foram produzidas pela Suzano S/A e transplantadas manualmente para o campo em 18/02/2015. O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC), com 10 tratamentos e 4 blocos (Tabela 3). As parcelas foram constituídas de 100 árvores (10x10 plantas) com espaçamento 3,00 por 2,25 m (1482 plantas ha⁻¹) e área de 675 m². Para a avaliação do experimento, a área útil da parcela foi desconsiderada as duas fileiras laterais, para efeito de bordadura, sendo avaliadas as 36 plantas do interior da parcela. A área total do experimento foi de 2,7 ha.

3.2.1 Caracterização do LE

O LE utilizado no experimento foi obtido na ETE-Judiai, da Companhia de Saneamento de Jundiaí (CSJ). O lodo é produzido por meio de sistema de lagoas aeradas de mistura completa seguido de lagoas de decantação. O deságue foi feito à base de polímeros catiônicos, floculação e posterior centrifugação, com período de condicionamento não inferior a 60 dias. A secagem foi realizada através de revolvimento mecânico em pátio revestido e coberto.

A caracterização química do LE foi feita conforme descrito no método SW-846-3051a, proposto pela *United States Environment Protection Agency* – USEPA (USEPA, 2007). O LE foi classificado como classe B e apresentou valores de substâncias orgânicas e inorgânicas dentro dos critérios estabelecidos pela CONAMA n.º 375/06. O resultado da caracterização química e os limites presentes na resolução encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3– Caracterização química do LE utilizado no experimento e valores limite da Res. CONAMA n.º 375/06

Parâmetro ⁽¹⁾	LE	Limite CONAMA ⁽²⁾
pH (H ₂ O)	6,8	...
----- % -----		
Umidade	62	...
Sólidos voláteis	49,37	...
Percentual de sólidos	32,7	...
Cinzas	50,63	...
----- g kg ⁻¹ -----		
Carbono orgânico	166,4	...
Nitrogênio total	36,5	...

Parâmetro⁽¹⁾	LE	Limite CONAMA⁽²⁾
Fósforo total	29,5	...
Potássio	19,6	...
Sódio	1,8	...
Enxofre	23,8	...
Cálcio	21,2	...
Magnésio	5	...
----- mg kg ⁻¹ -----		
Arsênio	3,26	41
Bário	629	1300
Cádmio	2,4	39
Chumbo	45,4	300
Cobre	308	1500
Crômio	60,9	1000
Mercurio	<0,05 ⁽³⁾	17
Molibdênio	8,03	50
Níquel	30,6	420
Selênio	<0,05 ⁽³⁾	100
Zinco	667	2800

Nota: (1) Valores com base em matéria seca. (2) Concentrações máximas permitidas de elementos inorgânicos presentes no LE para uso na agricultura de acordo com Res. n. ° 375/2006 do CONAMA. (3) Concentração inferior ao limite de detecção por ICP-OES.

3.2.2 Tratamentos

Os tratamentos experimentais foram: controle (T1), em que não foi aplicado nenhum tipo de fertilizante mineral ou LE; recomendação de adubação praticada pela empresa na ocasião da instalação do experimento (T2); adubação recomendada para eucalipto no Estado de São Paulo (T3). (RAIJ et al., 1996); nos tratamentos que utilizam LE (T4 a T10), adotou-se determinação da resolução CONAMA n. ° 375/06, a qual recomenda que a quantidade de lodo a ser aplicada seja definida em função do critério do nitrogênio.

O teor de N no lodo foi reanalisado, pelo método de Kjeldahl, antes da aplicação e o valor determinado foi de 22 g kg⁻¹. Esse novo procedimento se fez necessário, pois o material ficou no campo por cerca de 6 meses até a efetiva utilização. O fator de mineralização do N (FMN), foi fixado em 30% e o N_{recomendado} adotou a dose aplicada pela Suzano (T2). A dose de LE foi calculada segundo as Equações 1 e 2.

$$N_{\text{disp}} = (\text{FMN}/100) * N \quad (1)$$

N_{disp} = conteúdo de N do lodo disponível a planta (g kg⁻¹); N = Teor de N no lodo (g kg⁻¹); FMN = fator de mineralização do N (%)

$$\text{Dose} = N_{\text{recomendado}}/N_{\text{disp}} \quad (2)$$

Dessa forma, as doses de 50%, 100% e 150% correspondem respectivamente a 96, 192 e 288 kg N ha⁻¹, representando 14,5; 29 e 43,5 Mg ha⁻¹ de LE (base seca).

Os níveis para a adubação fosfatada (66% - T4 e T5; 83% - T9 e T10) foram definidas baseando-se em nos valores estabelecidos por Firme (2009) e Abreu-Junior et al. (2017). Esses valores relativos referem-se à dose de P₂O₅ utilizada no T2. Em momento anterior ao plantio das mudas, houve aplicação de 1,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 80%) visando o fornecimento de cálcio e magnésio. As fontes e as doses aplicadas são detalhadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Descrição dos tratamentos com as doses e o momento da aplicação

Tratamento	Período	Nutriente (kg ha ⁻¹)					
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	B	Zn	Cu
T1 – CONTROLE	Total	0	0	0	0	0	0
	Plantio	30 ⁽¹⁾	60 ⁽¹⁾	30 ⁽¹⁾	1,5 ⁽¹⁾	1,5 ⁽¹⁾	1,5 ⁽¹⁾
	Cobertura 1	45 ⁽²⁾		135 ⁽²⁾	1,8 ⁽²⁾	1,35 ⁽²⁾	1,35 ⁽²⁾
T2 – ADUBAÇÃO MINERAL 1	Cobertura 2	54 ⁽³⁾			1,5 ⁽³⁾		
	Cobertura 3	63 ⁽³⁾			1,75 ⁽³⁾		
	Total	192	60	165	6,55	2,85	2,85
	Plantio	20 ⁽¹⁾	40 ⁽¹⁾	20 ⁽¹⁾	1,0 ⁽¹⁾	1,0 ⁽¹⁾	1,0 ⁽¹⁾
T3 – ADUBAÇÃO MINERAL 2	Cobertura 1	27 ⁽²⁾		81 ⁽²⁾	1,08 ⁽²⁾	0,81 ⁽²⁾	0,81 ⁽²⁾
	Cobertura 2	13 ⁽⁴⁾			2,08 ⁽⁵⁾		
	Total	60,0	40,0	101,0	4,16	1,81	1,81
T4 – LE (100%) +P (66%) -B +K	Plantio	192 ⁽⁸⁾	40 ⁽⁶⁾	30 ⁽⁷⁾		19,3 ⁽⁸⁾	8,9 ⁽⁸⁾
	Cobertura 1		1959 ⁽⁸⁾	685 ⁽⁸⁾			
	Total	192	1999	850	0	19,3	8,9
	Plantio	192 ⁽⁸⁾	40 ⁽⁶⁾	30 ⁽⁷⁾	3,2 ⁽⁵⁾	19,3 ⁽⁸⁾	8,9 ⁽⁸⁾
T5 – LE (100%) +P (66%) +B +K	Cobertura 1		1959 ⁽⁸⁾	685 ⁽⁸⁾			
	Total	192	1999	850	6,5	19,3	8,9
	Plantio	192 ⁽⁸⁾	40 ⁽⁶⁾	30 ⁽⁷⁾	3,2 ⁽⁵⁾	19,3 ⁽⁸⁾	8,9 ⁽⁸⁾
T6 – LE (100%) -P +B +K	Cobertura 1		1959 ⁽⁸⁾	685 ⁽⁸⁾			
	Total	192	1959	850	6,5	19,3	8,9
	Plantio	288 ⁽⁸⁾	2938 ⁽⁸⁾	30 ⁽⁷⁾		29 ⁽⁸⁾	13,4 ⁽⁸⁾
T7 – LE (150%) -P -B +K	Cobertura 1			1027,4 ⁽⁸⁾			
	Total	288	2938	1192,4	0	29	13,4
	Plantio	288 ⁽⁸⁾	2938 ⁽⁸⁾	30 ⁽⁷⁾	3,2 ⁽⁵⁾	29 ⁽⁸⁾	13,4 ⁽⁸⁾
T8 – LE (150%) -P +B +K	Cobertura 1			1027,4 ⁽⁸⁾			
	Total	288	2938	1192,4	6,5	29	13,4
	Plantio	96 ⁽⁸⁾	50 ⁽⁶⁾	30 ⁽⁷⁾		9,6 ⁽⁸⁾	4,5 ⁽⁸⁾
T9 – LE (50%) +P (83%) -B +K	Cobertura 1		979,5 ⁽⁸⁾	342,5 ⁽⁸⁾			
	Total	96	1029,5	507,5	0	9,6	4,5
	Plantio	96 ⁽⁸⁾	50 ⁽⁶⁾	30 ⁽⁷⁾	3,2 ⁽⁵⁾	9,6 ⁽⁸⁾	4,5 ⁽⁸⁾
T10 – LE (50%) +P (83%) +B +K	Cobertura 1		979,5 ⁽⁸⁾	342,5 ⁽⁸⁾			
	Total	96	1029,5	507,5	6,5	9,6	4,5
	Plantio	96 ⁽⁸⁾	50 ⁽⁶⁾	30 ⁽⁷⁾	3,2 ⁽⁵⁾	9,6 ⁽⁸⁾	4,5 ⁽⁸⁾

Nota: As fontes utilizadas de cada nutriente são: (1) Adubo formulado 10-20-10 +0,5% B + 0,5% Zn + 0,5% Cu (2) Adubo formulado 10-00-30 + 0,4% B + 0,3% Zn + 0,3% Cu (3) Adubo formulado 18-00-00 + 0,5% B (4) Nitrato de amônio (5) Ulexita (6) Superfosfato triplo (7) Cloreto de potássio (KCl) (8) Lodo de esgoto

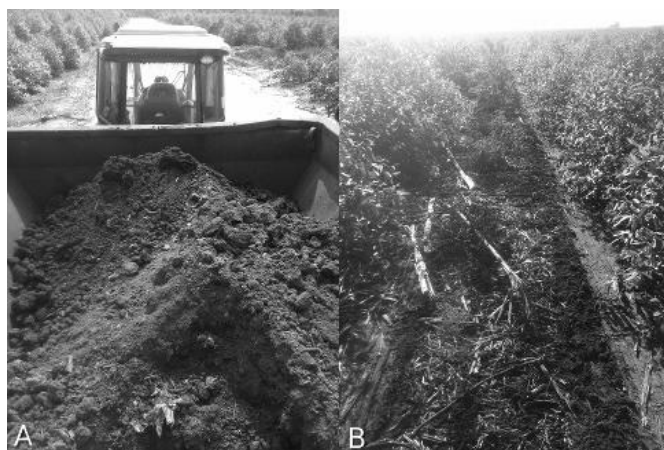
3.2.3 Implantação do experimento

O plantio existente anteriormente a implantação do experimento foi colhido em dezembro de 2014 de forma mecanizada e sem rebaixamento de toco. O controle de formigas foi feito com a disposição de iscas de sulfuramida na dose de 10 g m^{-2} de terra solta sobre o olheiro do formigueiro. O controle de plantas invasoras realizado com aplicação de herbicida sistêmico não seletivo na dose de 3 L ha^{-1} . O preparo de solo consistiu na subsolagem de 40 cm de profundidade apenas na linha de plantio.

Os tratamentos T2 e T3 receberam adubo formulado $10:20:10+0,5\%B+0,5\%Zn+0,5\%Cu$ nas linhas de plantio, nas quantidades respectivas de 300 e 200 kg ha^{-1} . No dia 18/02/2015, foi feito o plantio das mudas manualmente, com a utilização de uma cavadora (matraca), concomitantemente foi feita aplicação do adubo fosfato na forma de covetas laterais.

A aplicação do LE não pode ser feita no momento do plantio das mudas devido a dificuldades quanto a disponibilidade dos equipamentos necessários. Dessa forma, a aplicação ocorreu 7 meses após o plantio, no dia 17/09/2015, com a utilização de um conjunto mecanizado composto por uma carreta aplicadora de esteira e um trator agrícola. O LE foi aplicado nas entrelinhas de plantio, sem incorporação ao solo. A calibração da carreta foi feita para que se aplicasse 50% da dose de LE, assim, com duas e três passadas se atingiu a dose necessária para os tratamentos 100% e 150%

Figura 3 – Aplicação do LE. A) Carreta carregada com o LE B) Entrelinha do plantio com o LE aplicado



3.3 Monitoramento do crescimento das árvores

3.3.1 Inventário dendrométrico

O inventário contínuo do experimento consistiu na medição das árvores da parcela útil, composta por um arranjo retangular de 6 por 6 plantas, num total de 36 árvores. Duas vezes ao ano foram registradas a circunferência a altura do peito (CAP), medida a 1,30 m do nível do solo, de todas as plantas da parcela. As alturas das árvores da parcela foram estimadas a partir de um modelo hipsométrico (Equação 3), ajustado para todos os inventários por meio do software R (R CORE TEAM, 2016). Para o ajuste do modelo foram medidas a altura de 7 árvores das linhas centrais da parcela útil e mais 3 árvores dominantes, definidas como aquelas que possuíam os maiores CAP e nenhum defeito aparente. A performance dos modelos foi avaliada através do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) e o erro médio absoluto (EMA)

$$\ln(H) = 0,607198 - 3,397469(1/DAP) + 0,866287\ln(mhdom) \quad (3)$$

Em que, H : altura da planta; DAP : diâmetro a altura do peito; $mhdom$: altura média das árvores dominantes. Parâmetros de ajuste do modelo: $R^2_{aj} = 0,93$, $EMA = 0,6$; $n = 1779$.

A primeira medição ocorreu em 13/08/2016, quando o povoamento tinha cerca de 18 meses. A segunda medição, em 21/12/2016, com 22 meses. A terceira em 27/07/2017, com 30 meses. A quarta medição, última a ser considerada neste trabalho, foi feita em 21/12/2017, quando o experimento tinha 35 meses de idade.

3.3.2 Inventário destrutivo

Inicialmente, com base nas informações obtidas no inventário dendrométrico de 21/12/2016, a população foi dividida em quatro classes de diâmetro, com dez árvores por classe. As árvores foram cortadas na bordadura das parcelas, sendo uma por parcela, desta maneira, cada um dos tratamentos forneceu uma árvore para cada classe de diâmetro. Posteriormente, o ajuste das equações de volume e biomassa foi realizado em 21/02/2017, quando o experimento tinha 24 meses, por meio de inventário destrutivo.

Definiu-se o diâmetro mínimo de três centímetros para determinação da altura comercial (H_c), a partir desse comprimento o tronco foi dividido em quatro partes e

um disco de cerca de 2 cm de espessura foi cortado em cada posição para determinação do teor de umidade. Também foram anotados o diâmetro da base, a altura do peito, 25, 50, 75 e 100% em relação a Hc. A totalidade dos componentes, tronco, galhos (vivos e mortos), folhas, foram separados e pesados em campo, com balança com precisão de 2 g.

O modelo logarítmico de Spurr (SPURR, 1952) foi o que melhor se ajustou para previsão da biomassa dos compartimentos, tendo sido ajustado um modelo para todos os tratamentos.

3.3.2.1 Biomassa do fuste com casca

Biomassa do fuste foi obtida pela equação de predição de biomassa do fuste, com os coeficientes ajustados (Equação 4).

$$\ln(B) = -3,99467 + 0,97817\ln(DAP^2 * H) \quad (4)$$

Em que, *B*: biomassa (base seca) do fuste (kg árvore⁻¹); *DAP*: diâmetro a altura do peito (cm); *H*: altura da árvore (m). Parâmetros de ajuste do modelo: R²_{aj} = 0,97; EMA = 1,8; n = 40.

3.3.2.2 Biomassa de folhas

O modelo de predição de biomassa foi ajustado tanto para biomassa total de folhas da copa (Equação 5) como para cada um de seus terços (Equações 6,7 e 8).

$$\ln(Ft) = -7,17584 + 1,13434\ln(DAP^2*H) \quad (5)$$

Em que, *Ft*: biomassa (base seca) total de folhas (kg árvore⁻¹); *DAP*: diâmetro a altura do peito (cm); *H*: altura da árvore (m). Parâmetros de ajuste do modelo: R²_{aj} = 0,94; EMA = 0,3; n = 40.

$$\ln(Fs) = -8,6831 + 1,1576\ln(DAP^2*H) \quad (6)$$

Em que, *Fs*: biomassa (base seca) de folhas no terço superior (kg árvore⁻¹); *DAP*: diâmetro a altura do peito (cm); *H*: altura da árvore (m). Parâmetros de ajuste do modelo: R²_{aj} = 0,69; EMA = 0,19; n = 40.

$$\ln(Fm) = -8,89910 + 1,25398\ln(DAP^2*H) \quad (7)$$

Em que, F_m : biomassa (base seca) de folhas no terço médio (kg árvore^{-1}); DAP : diâmetro a altura do peito (cm); H : altura da árvore (m). Parâmetros de ajuste do modelo: $R^2_{aj} = 0,91$; $EMA = 0,16$; $n = 40$.

$$\ln(F_i) = -7,65737 + 1,03034\ln(DAP^2*H) \quad (8)$$

Em que, F_i : biomassa (base seca) de folhas no terço inferior (kg árvore^{-1}); DAP : diâmetro a altura do peito (cm); H : altura da árvore (m). Parâmetros de ajuste do modelo: $R^2_{aj} = 0,76$; $EMA = 0,15$; $n = 40$.

3.3.2.3 Área foliar

Para o cálculo da área foliar, foram coletadas 15 folhas por indivíduo, 5 por terço da copa, que não apresentassem doenças, sinais de predação ou qualquer tipo de defeito. No campo foram acondicionadas em recipiente térmico e levadas para o laboratório e tiveram sua área determinada com o uso do *scanner* LiCOR Li-3100C. As amostras foram secas em estufa de circulação forçada até peso constante e sua massa aferida em balança de precisão.

A área encontrada para cada amostrada foi dividida pela massa (base seca) e assim obtida a área foliar específica ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$). Multiplicando-se esse valor pela biomassa total de folhas da árvore foi obtida a área foliar de cada indivíduo e então relacionada às variáveis DAP e altura (Equação 9).

$$\ln(A_f) = -3,78433 + 0,98182\ln(DAP^2*H) \quad (9)$$

Em que, A_f : área foliar ($\text{m}^2 \text{árvore}^{-1}$); DAP : diâmetro a altura do peito (cm); H : altura da árvore (m). Parâmetros de ajuste do modelo: $R^2_{aj} = 0,92$; $EMA = 3$; $n = 40$.

O cálculo do índice de área foliar (IAF) consistiu na soma da área foliar de cada planta dividida pela área ocupada por esses indivíduos.

3.3.2.4 Volume do fuste com casca

O volume total do tronco foi obtido através da soma do volume calculado de cada uma das quatro seções em que foi dividido, utilizando-se a equação de Smalian (Equação 10):

$$V = \pi/4*[(A+a)/2]*L \quad (10)$$

Em que, V : volume do tronco; A : área transversal da seção de maior diâmetro; a : área transversal da seção de menor diâmetro; L : comprimento da seção.

E equação final de volume ajustou-se melhor ao modelo logarítmico de Spurr, os valores ajustados podem ser vistos na equação (11):

$$\ln(V) = -9,93008 + 0,96293 * \ln(DAP^2 * H) \quad (11)$$

Em que, V : volume do fuste com casca (m^3); DAP : diâmetro a altura do peito (cm); H : altura da árvore (m). Parâmetros de ajuste do modelo: $R^2_{aj} = 0,99$; $EMA = 0,001$, $n = 40$.

3.3.3 Monitoramento quinzenal do incremento

Em 25/11/2016, aos 21 meses de idade, foram instaladas faixas dendrométricas (ou dendrômetros de banda) permanentes a 1,30 m de altura do solo. Detalhes da construção das faixas podem ser encontrados em Alvares et al. (2017).

Os dendrômetros foram confeccionados utilizando aço inoxidável 304, com 12,7 mm de largura e 0,15 mm de espessura. O tracionamento do equipamento é feito utilizando uma mola de aço inoxidável de 110 por 8 mm, respectivamente comprimento e diâmetro, e capacidade de carga de 2,5 kg. O comprimento da fita é determinado a partir da medida da circunferência do troco a altura do peito (Figura 4-A) e somando-se a esse valor 17 cm adicionais para sobreposição da escala do nônio. A escala e o nônio (Figura 4-B) foram confeccionados de adesivo tipo lona. A escala fixa tem 100 mm de comprimento por 10 mm de largura, tendo 10 divisões grandes e 50 divisões pequenas, graduado de 0 a 50, dessa maneira. O nônio é um adesivo menor com 18 mm de comprimento por 5 mm de largura, com 10 divisões pequenas.

Figura 4 – Utilização dos dendrômetros de banda. A) Medição da circunferência do tronco B) Dendrômetro instalado na árvore



Fonte: O autor.

A instalação dos dendrômetros ocorreu no dia 25/11/2016, ocasião em que as plantas estavam com cerca de 21 meses de idade. Após um período de espera, para que houvesse acomodação dos dendrômetros ao tronco das árvores, iniciaram-se os registros de circunferência, no dia 19/01/2017 (plantas com 23 meses de idade), seguindo com esse procedimento a cada 15 dias, até a data de 18/01/2018 (plantas com 35 meses de idade). As leituras foram realizadas no período da manhã e seguindo a mesma ordem de caminhamento dentro da área útil de cada parcela. No total, foram feitas medições em 27 épocas.

Os dendrômetros indicam o incremento das árvores a partir do momento em que foram instalados. Dessa maneira para obter o CAP do tronco, em cada época, o valor lido foi convertido para centímetros, multiplicando-o por 0,2 e, posteriormente, somando o valor inicial do CAP daquela árvore. O DAP é obtido, assumindo a sessão transversal como circular, conforme equação 12:

$$DAP = CAP/\pi$$

(12)

Uma vez que eram medidos os diâmetros de apenas 20 árvores de cada tratamento, a obtenção dos diâmetros das demais árvores da parcela, foi feito com o ajuste de um modelo de predição a partir da relação entre o DAP medido na época t e o seu DAP na época $t+1$, ou seja, relacionou-se o diâmetro das árvores amostradas na época 1 com os diâmetros das mesmas árvores na época 2 e assim, sucessivamente, para cada par de medição.

O modelo geral ajustado para predição do diâmetro futuro de cada árvore é expresso pela equação 13.

$$DAP_{f_{ij+1k}} = \beta_0 + \beta_1(DAP_{ijk}) \quad (13)$$

Em que, $DAP_{f_{ijk}}$ = DAP futuro da árvore i no período $j+1$ do tratamento k ; DAP_{ijk} = DAP presente da árvore i no período j do tratamento k .

3.4 Monitoramento meteorológico

Os dados de temperatura do ar, precipitação, umidade relativa foram obtidas por meio de uma estação meteorológica automática, instalada na sede na fazenda, e gentilmente disponibilizadas pela empresa. Os dados foram coletados no período entre 19/01/2017 e 18/01/2018, intervalo no qual os incrementos em diâmetro das árvores foram monitorados com os dendrômetros. Para que houvesse coincidência com os intervalos de leituras em campo, os dados foram sumarizados em períodos de 14 dias.

O déficit de pressão de vapor (DPV) é obtido ao subtrair-se a pressão de saturação de vapor d'água (e_s) da pressão de vapor atual (e_a), consideradas como a média dos valores diários destas variáveis ao longo de cada período de medição, conforme equação 14.

$$DPV = e_s - e_a \quad (14)$$

As determinações de e_s e e_a foram feitas conforme recomendado no Boletim n.º 56 da FAO (ALLEN et al., 1998). A pressão de vapor e_0 foi calculada usando a equação 15.

$$e_0(T) = 0,6108 * e^{(17,27 * T / (T + 237,3))} \quad (15)$$

Em que, e_0 : pressão de saturação de vapor na temperatura do ar (kPa)
 T: temperatura do ar (°C)

Para o computo da pressão de saturação diária foi calculado a média conforme a equação 16.

$$e_s = [e_0(T_{\max}) + e_0(T_{\min})]/2 \quad (16)$$

Em que, e_s : pressão de saturação média (kPa); T_{\max} : temperatura máxima diária (°C); T_{\min} : temperatura mínima diária (°C)

A pressão de vapor atual (e_a) foi determinada por meio dos dados de umidade relativa (UR) diárias (equação 17).

$$e_a = [e_0(T_{\min}) * (UR_{\max}/100) + e_0(T_{\max}) * (UR_{\min}/100)]/2 \quad (17)$$

Em que, e_a : pressão de vapor atual (kPa); $e_0(T_{\min})$: pressão de vapor de saturação na temperatura mínima do dia (kPa); $e_0(T_{\max})$: pressão de vapor de saturação na temperatura máxima do dia (kPa); UR_{\max} : umidade relativa média máxima do dia (%); UR_{\min} : umidade relativa média mínima do dia (%)

O balanço hídrico sequencial foi calculado pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), utilizando planilha eletrônica desenvolvida por Rolim et al. (1998). A capacidade de água disponível no solo (CAD) foi estimada em 240 mm, através do modelo ajustado por Alvares (2011), para solos semelhantes ao do local do experimento, em função do teor de argila determinado na camada 0 – 40 cm (Equação 18).

A profundidade efetiva foi considerada como de 3 m, baseando-se em estudo desenvolvido por Laclau et al. (2013), que evidenciou a grande capacidade do gênero *Eucalyptus* em explorar camadas profundas do solo.

$$CAD = -0,0216*(C^{0,8133}) + 6.4967 * e^{(-170,5459/C)} * Z \quad (18)$$

Em que CAD = capacidade de armazenamento de água (mm); C = teor de argila ($g\ kg^{-1}$); e = base do logaritmo natural; Z = profundidade da camada (cm).

3.5 Forma de análise dos resultados

As análises estatísticas foram feitas utilizando o software estatístico R (R CORE TEAM, 2016). Os dados dos inventários foram submetidos a análise de

variância (ANOVA) e ao teste de comparação de médias de Tukey a 5% de probabilidade utilizando o pacote *agricolae*.

Os efeitos das variáveis meteorológicas foram estudados através de análise multivariada (Equação 19). Para que não houvesse superparametrização do modelo foi aplicado o processo de seleção de variáveis pelo método de regressão *stepwise* através da função *stepAIC* do pacote *MASS*.

$$Vinc = \beta_0 + \beta_1 P + \beta_2 DPV + \beta_3 Tmax + \beta_4 Tmin + \beta_5 ETP + \beta_6 ETR \quad (19)$$

Em que Vinc = incremento de volume ($m^3 ha^{-1} quinzena^{-1}$); P = chuva (mm); DPV = déficit de pressão de vapor (kPa); Tmax = temperatura máxima ($^{\circ}C$); Tmin = temperatura mínima ($^{\circ}C$); ETP = evapotranspiração potencial (mm); ETR = evapotranspiração real (mm).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estoque de madeira

O primeiro inventário ocorreu quando as árvores tinham 18 meses de idade e prosseguiram até os 35 meses, num total de quatro medições. Aos 18 meses havia um estoque de madeira que variava entre 43,3 e 53,8 m³ ha⁻¹, tratamentos LE150-P-B+K e MINERAL 2, respectivamente. O panorama geral do experimento nesta ocasião está expresso na Tabela 5.

Tabela 5– Resultado do inventário realizado aos 18 meses de idade do povoamento. Os dados consistidos são volume de madeira (Estoque), o DAP médio (DAP), altura média das árvores (H), altura média das dominantes (Hdom), área basal (G), índice de uniformidade (PV50), e sobrevivência das árvores (Sobrev)

Tratamentos	Estoque m ³ ha ⁻¹	DAP cm	H m	G m ² ha ⁻¹	Hdom m	PV50 %	Sobrev. %
CONTROLE	47,6 ± 3,5	8,4 ± 0,3	11 ± 0,4	8,5 ± 0,6	12,9	37	97
MINERAL 1	46,5 ± 9,6	8,8 ± 0,4	10,2 ± 1,9	9,2 ± 0,7	11,5	39,6	96
MINERAL 2	53,8 ± 3,2	8,9 ± 0,1	11,7 ± 0,2	9,4 ± 0,3	13,2	40,8	97
LE50+P83-B+K	47,1 ± 11,4	8,8 ± 0,3	10,5 ± 2	9,1 ± 0,6	11,8	40,8	99
LE50+P83+B+K	43,9 ± 7	8,6 ± 0,2	10,3 ± 1,3	8,7 ± 0,5	11,7	39,2	95
LE100+P66-B+K	51,2 ± 8,3	8,8 ± 0,3	11,2 ± 1,8	9,3 ± 0,5	12,7	40,2	97
LE100+P66+B+K	49,8 ± 9,5	8,8 ± 0,5	10,8 ± 1,4	9,2 ± 0,9	12,3	35	93
LE100-P+B+K	48,1 ± 7,3	8,5 ± 0,2	11,2 ± 1,5	8,6 ± 0,3	13	35,7	93
LE150-P-B+K	43,3 ± 9,4	8,6 ± 0,5	9,6 ± 1,8	8,8 ± 0,8	10,9	38,4	99
LE150-P+B+K	46,8 ± 5,4	8,6 ± 0,4	10,7 ± 1,4	8,9 ± 0,6	12,2	39,6	99
Média	47,8	8,7	10,7	9	12,22	38,6	96,5
CV (%)	6,6	1,9	5,6	3,5	6,1	5,4	2,4

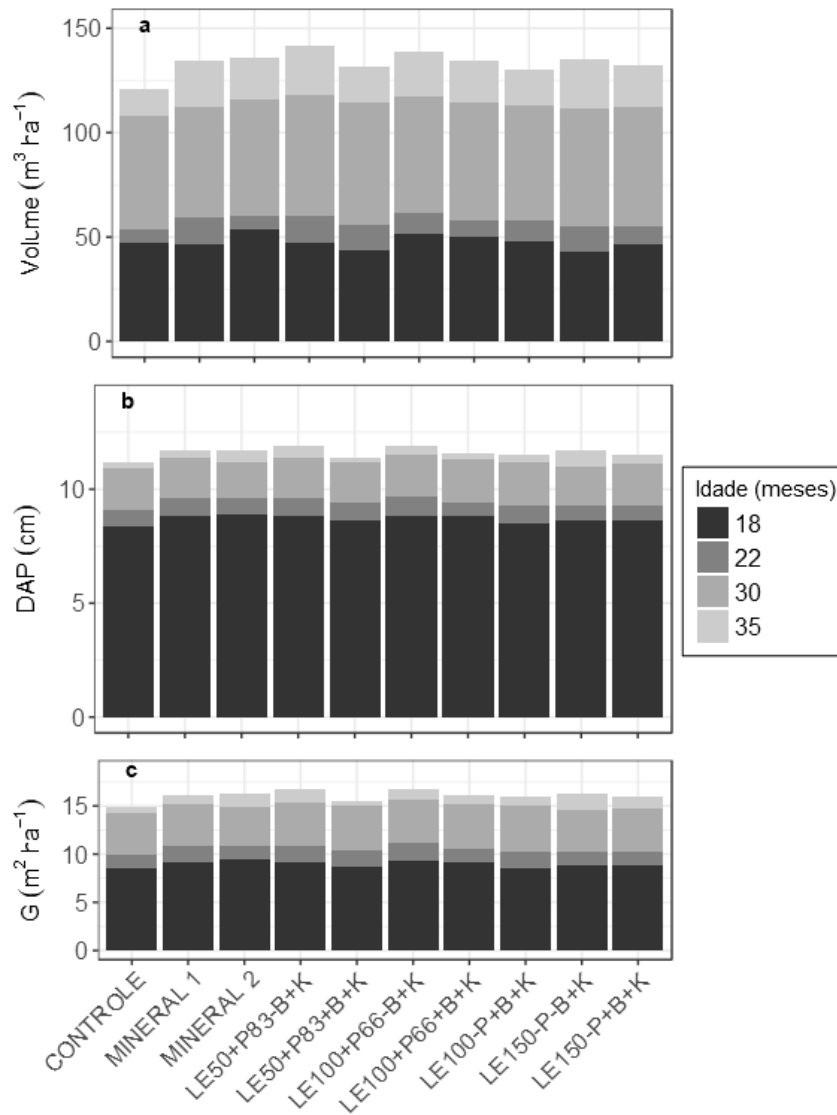
Média = média entre os tratamentos; CV = coeficiente de variação. Os valores ao lado das variáveis Estoque, DAP, H e G correspondem aos desvios padrão dos dados. (n = 1440).

CONTROLE = tratamento sem nenhum tipo de adução; MINERAL 1 = adubação praticada pela empresa; MINERAL 2 = adubação recomendada por Raij et al. (1996); LE = o número que acompanha este prefixo representa o percentual relativo da dose, 50%, 100%, 150% ou 14,5, 29 e 43,5 Mg ha⁻¹ (base seca); P = dose de adubo fosfatado (supertriplo). 66% e 83% correspondem a 40 e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅; B = 6,5 kg ha⁻¹ deste nutriente aplicado via ulexita; K = 165 kg ha⁻¹ de K₂O, desconsiderando o K presente no lodo, aplicado via KCl

De maneira geral, pode-se dizer que os tratamentos apresentavam boa uniformidade (PV50 médio de 38,6%) e pouca variação entre os estoques, característica das fases iniciais do crescimento, bem como elevada taxa de sobrevivência das parcelas.

No último inventário, em 21/12/2017, aos 35 meses de idade, os volumes variavam entre 120,7 e 141,7 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ com a média de 133,5 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$. A evolução do volume de madeira com casca, DAP e área basal em função dos tratamentos está apresentado na Figura 6.

Figura 5– Evolução do volume (a), do DAP (b) e da área basal (c) médios das parcelas



Fonte: o autor

As variáveis dendrométricas DAP e área basal (G) não se mostraram muito distintas entre os tratamentos, com muita similaridade entre elas. Somente o estoque de madeira demonstra ligeira vantagem para o tratamento LE50+P83-B+K.

O tratamento LE50+P83-B+K (14,5 Mg ha⁻¹ de LE), mais bem-sucedido em termos de estoque de madeira (Tabela 6). Apresentou produtividade cerca de 17% maior que o CONTROLE, no entanto o teste de Tukey não apontou diferença estatisticamente significativa entre todos os tratamentos.

Tabela 6 –Volumes de madeira com casca obtidos aos 35 meses de idade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a probabilidade de 5%

Tratamentos	Volume (m ³ ha ⁻¹)	Desvio padrão
CONTROLE	120,7 (a)	11,4
MINERAL 1	134,3 (a)	13,4
MINERAL 2	135,8 (a)	8,6
LE50+P83-B+K	141,7 (a)	9,6
LE50+P83+B+K	131,6 (a)	11,9
LE100+P66-B+K	138,6 (a)	10,3
LE100+P66+B+K	134,3 (a)	7,2
LE100-P+B+K	130 (a)	5
LE150-P-B+K	135,3 (a)	8,1
LE150-P+B+K	132,2 (a)	10,4

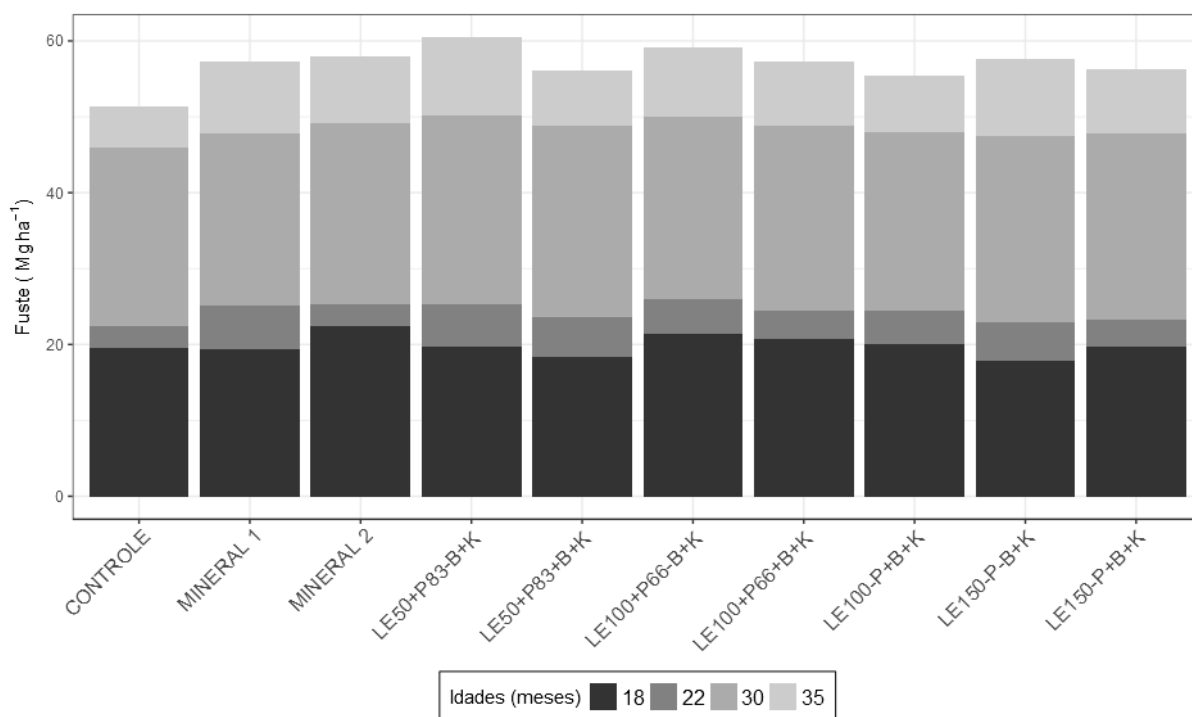
CONTROLE = tratamento sem nenhum tipo de adução; MINERAL 1 = adubação praticada pela empresa; MINERAL 2 = adubação recomendada por Rajij et al. (1996); LE = o número que acompanha este prefixo representa o percentual relativo da dose, 50%, 100%, 150% ou 14,5, 29 e 43,5 Mg ha⁻¹ (base seca); P = dose de adubo fosfatado (supertriplo). 66% e 83% correspondem a 40 e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅; B = 6,5 kg ha⁻¹ deste nutriente aplicado via ulexita; K = 165 kg ha⁻¹ de K₂O, desconsiderando o K presente no lodo, aplicado via KCl

Esse comportamento em que o crescimento total é numericamente superior, porém não significativo, também foi evidenciado por Vaz e Gonçalves (2002). Estes autores num experimento com doses crescentes de LE, encontraram, também, que uma dose de 10 Mg ha⁻¹ de LE suplementada com K e P apresentou a maior taxa de crescimento aos 24 meses de idade. Também observaram que a resposta à aplicação de LE eleva-se com a idade em decorrência da solubilização e mineralização do resíduo.

4.2 Biomassa

Os dados obtidos para evolução da biomassa de fuste com casca ao longo dos inventários estão expressos na Figura 7. A análise estatística mostrou que não houve diferenças significativas entre os tratamentos. O tratamento LE50+P83-B+K apresentou ligeira vantagem em relação aos demais. Esse tratamento foi 17% mais produtivo que o CONTROLE e apenas 5% mais produtivo que a adubação realizada pela empresa (MINERAL 1)

Figura 6– Evolução do estoque de biomassa (base seca) do fuste ao longo dos quatro inventários. As diferentes cores dentro de cada barra representam o incremento observado entre cada medição.



CONTROLE = tratamento sem nenhum tipo de adução; MINERAL 1 = adubação praticada pela empresa; MINERAL 2 = adubação recomendada por Raij et al (1996); LE = o número que acompanha este prefixo representa o percentual relativo da dose, 50%, 100%, 150% ou 14,5, 29 e 43,5 Mg ha⁻¹ (base seca); P = dose de adubo fosfatado (supertriplo). 66% e 83% correspondem a 40 e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅; B = 6,5 kg ha⁻¹ deste nutriente aplicado via ulexita; K = 165 kg ha⁻¹ de K₂O, desconsiderando o K presente no lodo, aplicado via KCl

Fonte: o autor.

Embora os valores encontrados sejam numericamente distintos, a análise estatística pelo teste de Tukey (Tabela 7), revela que não há diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos.

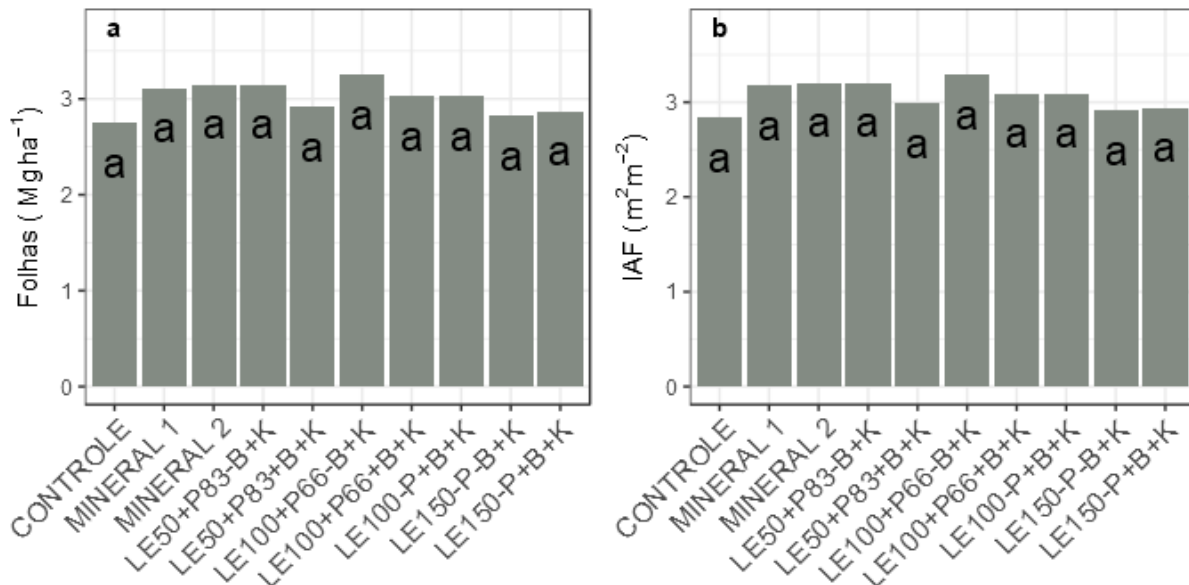
Tabela 7 – Estoque de biomassa de fuste com casca aos 35 meses de idade Resultado do teste de Tukey a probabilidade de 5%. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si

Tratamento	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Desvio padrão
CONTROLE	51,4 (a)	5
MINERAL 1	57,3 (a)	5,8
MINERAL 2	57,9 (a)	3,7
LE50+P83-B+K	60,5 (a)	4,1
LE50+P83+B+K	56,1 (a)	5,2
LE100+P66-B+K	59,1 (a)	4,4
LE100+P66+B+K	57,3 (a)	3,1
LE100-P+B+K	55,4 (a)	2,1
LE150-P-B+K	57,7 (a)	3,5
LE150-P+B+K	56,4 (a)	4,5

CONTROLE = tratamento sem nenhum tipo de adubação; MINERAL 1 = adubação praticada pela empresa; MINERAL 2 = adubação recomendada por Raij et al. (1996); LE = o número que acompanha este prefixo representa o percentual relativo da dose, 50%, 100%, 150% ou 14,5, 29 e 43,5 Mg ha⁻¹ (base seca); P = dose de adubo fosfatado (supertríplo). 66% e 83% correspondem a 40 e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅; B = 6,5 kg ha⁻¹ deste nutriente aplicado via ulexita; K = 165 kg ha⁻¹ de K₂O, desconsiderando o K presente no lodo, aplicado via KCl

A análise dos dados de biomassa de folhas demonstrou bastante uniformidade entre os tratamentos, os valores oscilaram entre 2,8 e 3,3 Mg ha⁻¹, tratamentos CONTROLE e L100+P66-B+K, respectivamente (Figura 8). O IAF (Figura 8-b) seguiu a mesma tendência da biomassa de folha. Da mesma forma que para as outras variáveis de crescimento não houve diferença estatisticamente significativa. Todos os tratamentos foram colocados no mesmo grupo pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Figura 7– Biomassa total de folhas (a) e IAF (b) estimadas aos 22 meses de idade. O resultado do teste de Tukey a 5% de probabilidade está expresso no interior da barra. Médias seguidas da mesma letra não são diferentes entre si



CONTROLE = tratamento sem nenhum tipo de adução; MINERAL 1 = adubação praticada pela empresa; MINERAL 2 = adubação recomendada por Raji et al (1996); LE = o número que acompanha este prefixo representa o percentual relativo da dose, 50%, 100%, 150% ou 14,5, 29 e 43,5 Mg ha⁻¹ (base seca); P = dose de adubo fosfatado (supertriplo). 66% e 83% correspondem a 40 e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅; B = 6,5 kg ha⁻¹ deste nutriente aplicado via ulexita; K = 165 kg ha⁻¹ de K₂O, desconsiderando o K presente no lodo, aplicado via KCl

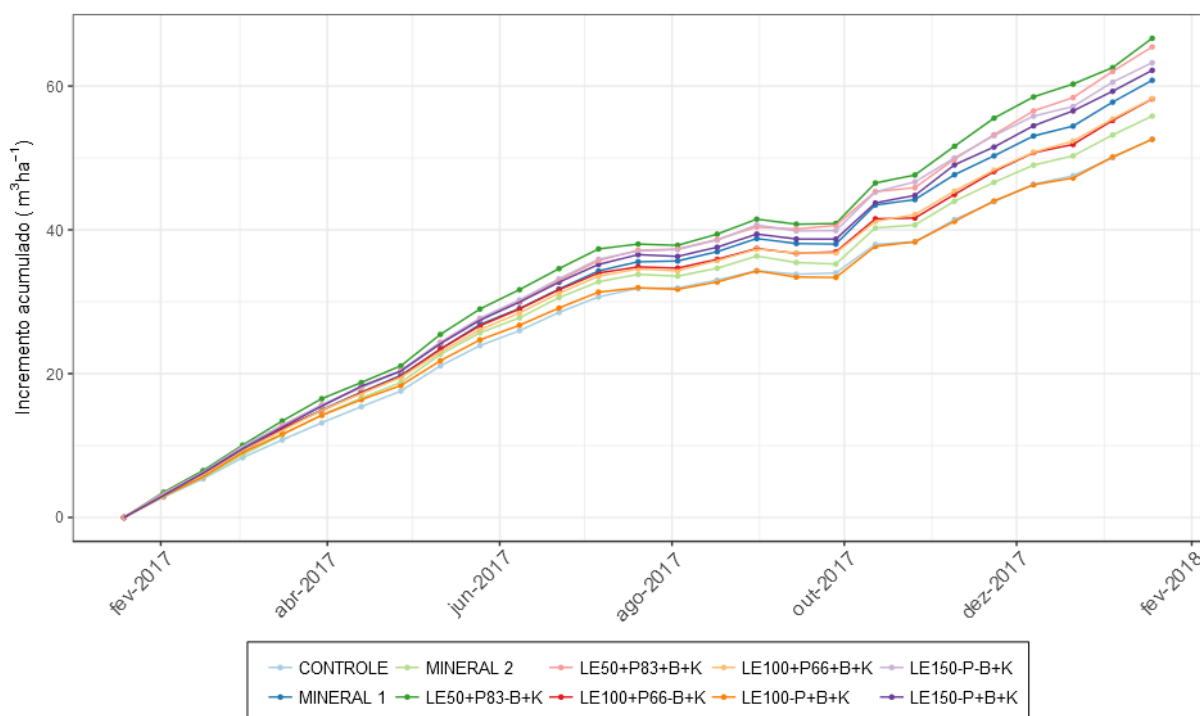
Fonte: o autor.

A pouca diferenciação entre os tratamentos pode ser explicada, por um lado, pela demora na aplicação do lodo, que atrasou em quase seis meses e por outro pela baixa precipitação observada no ano de 2017 (Figura 11) e que limitou a expressão dos tratamentos.

4.2 Monitoramento quinzenal do crescimento

O incremento acumulado mostrou comportamento muito semelhante entre os tratamentos. O tratamento LE50+P83-B+K atingiu incremento acumulado de 66,6 m³ ha⁻¹ ao longo do período de medições, na sequência temos os tratamentos LE50+P83+B+K, LE150-P-B+K, LE150-P+B+K, MINERAL 1, LE100+P66+B+K, LE100+P66-B+K, MINERAL 2 e por fim CONTROLE e LE100-P+B+K praticamente empatados com os menores incrementos acumulados.

Figura 8— Volume de madeira com casca acumulado ao longo dos períodos de medição em função dos tratamentos



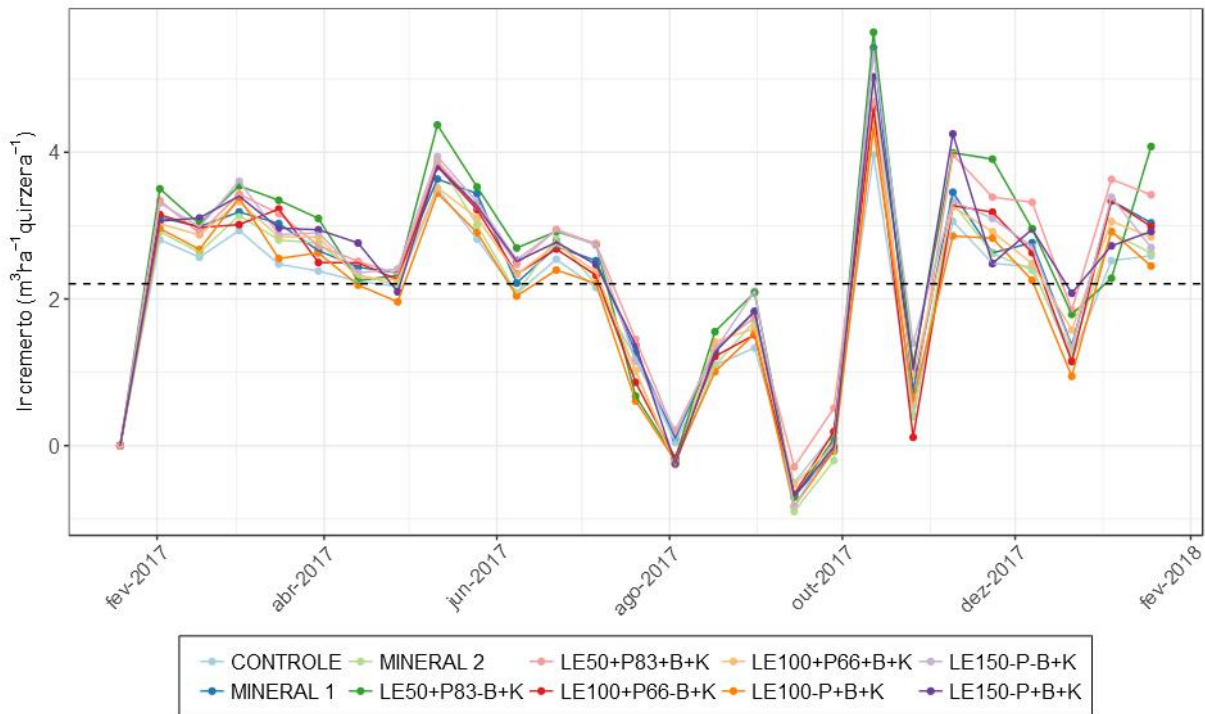
CONTROLE = tratamento sem nenhum tipo de adução; MINERAL 1 = adubação praticada pela empresa; MINERAL 2 = adubação recomendada por Raij et al (1996); LE = o número que acompanha este prefixo representa o percentual relativo da dose, 50%, 100%, 150% ou 14,5, 29 e 43,5 Mg ha⁻¹ (base seca); P = dose de adubo fosfatado (supertríplo). 66% e 83% correspondem a 40 e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅; B = 6,5 kg ha⁻¹ deste nutriente aplicado via ulexita; K = 165 kg ha⁻¹ de K₂O, desconsiderando o K presente no lodo, aplicado via KCl

Fonte: o autor

A taxa de incremento quinzenal de volume variou consideravelmente ao longo do ano (Figura 10), ficando a média para todos os tratamentos ao redor de 2,2 m³ ha⁻¹ quinzena⁻¹. Notadamente os períodos de fevereiro a julho e outubro a fevereiro mostraram os maiores índices de crescimento.

Por outro lado, o período julho a outubro, marcado pela baixa pluviosidade (Figura 11), apresentou os menores incrementos, inclusive, com decréscimo dessa variável, devido à incapacidade de reposição de água no xilema. O pico de crescimento observado em setembro/2017 pode ser explicado pela rápida reabsorção de água ocorrida em decorrência de um aporte considerável de chuva. Comportamento semelhante da variação de incremento foi observada por Mattos (2015) e Sette-Júnior et al. (2012).

Figura 9– Incremento quinzenal em volume ao longo do período de medições, a linha pontilhada representa a média dos incrementos

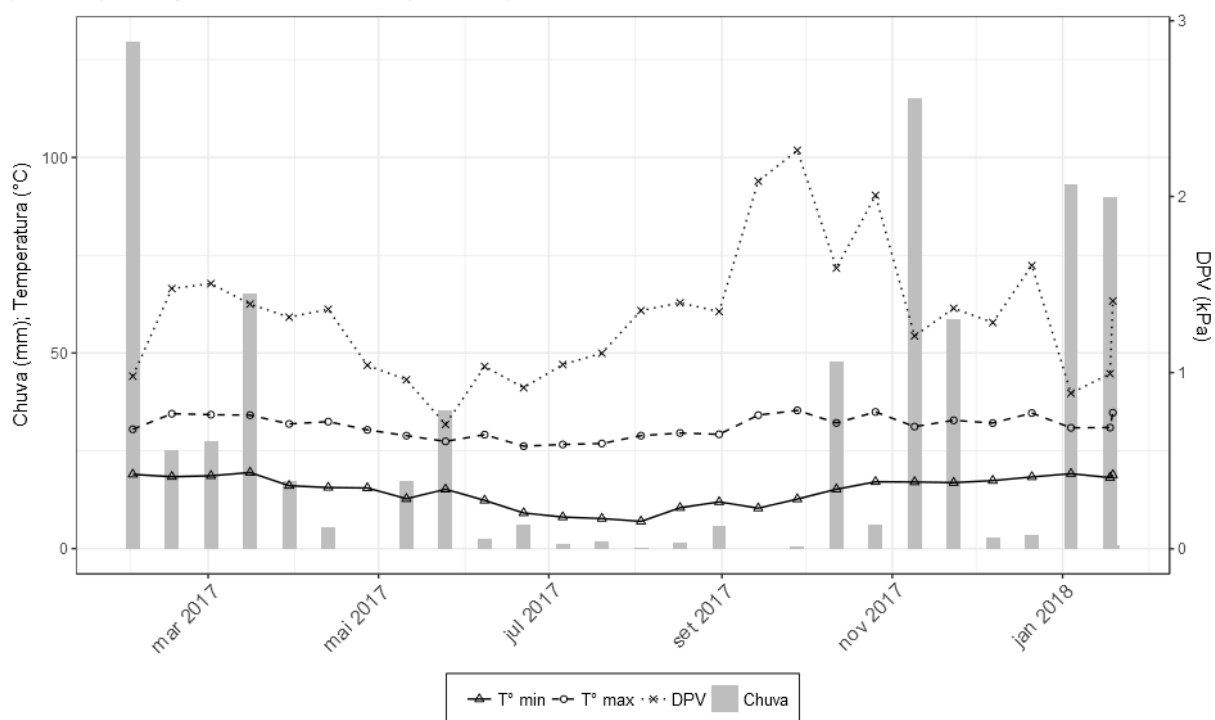


CONTROLE = tratamento sem nenhum tipo de adução; MINERAL 1 = adubação praticada pela empresa; MINERAL 2 = adubação recomendada por Raij et al (1996); LE = o número que acompanha este prefixo representa o percentual relativo da dose, 50%, 100%, 150% ou 14,5, 29 e 43,5 Mg ha⁻¹ (base seca); P = dose de adubo fosfatado (supertriplo). 66% e 83% correspondem a 40 e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅; B = 6,5 kg ha⁻¹ deste nutriente aplicado via ulexita; K = 165 kg ha⁻¹ de K₂O, desconsiderando o K presente no lodo, aplicado via KCl

Fonte: o autor

A confrontação dos dados da Figura 10 com os da Figura 11 evidencia a relação positiva existente entre o incremento das árvores e a chuva e o efeito negativo do DPV e da temperatura máxima.

Figura 10– Comportamento quinzenal das variáveis meteorológicas temperatura mínima ($T^{\circ} \text{ min}$); temperatura máxima ($T^{\circ} \text{ max}$) e chuva



Fonte: o autor

Nota-se grande influência da temperatura máxima na restrição ao crescimento das árvores (Tabela 8), ficando ao redor de $0,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para elevação de 1° C nesta variável. Tamanho foi a influência dessa variável que P, ETP e ETR sequer foram consideradas no ajuste final do modelo. Ferreira (2009) estudando um povoamento do *E. grandis* x *E. urophylla* no sul da Bahia também encontrou efeito negativo da temperatura máxima relacionando-o ao aumento do DPV.

Tabela 8– Coeficientes de regressão ajustados para variáveis meteorológicas de todos os tratamentos

Treatamento	β_0	DPV $m^3 ha^{-1} kPa^{-1}$	Tmax	Tmin	R ² aj	p-valor	RMSE $m^3 ha^{-1}$
CONTROLE	7,889***		-0,313***	0,266***	0,55	<0,001	0,69
MINERAL 1	9,10546***		-0,36766***	0,32132***	0,55	<0,001	0,84
MINERAL 2	8,89393***		-0,36367***	0,31416***	0,51	<0,001	0,87
LE50+P83-B+K	8,77966**		-0,36188**	0,34672***	0,48	<0,001	1
LE50+P83+B+K	2,66944**	-1,98088***		0,16839***	0,58	<0,001	0,77
LE100+P66-B+K	2,46648*	-2,07804***		0,17199***	0,57	<0,001	0,81
LE100+P66+B+K	7,98281***		-0,32850***	0,30797***	0,59	<0,001	0,72
LE100-P+B+K	7,71177***		-0,32527***	0,30465***	0,55	<0,001	0,78
LE150-P-B+K	8,99698***		-0,35796***	0,31448***	0,52	<0,001	0,86
LE150-P+B+K	8,24653**		-0,33739***	0,31923***	0,52	<0,001	0,86

B_0 = intercepto do modelo; DPV = déficit de pressão de vapor (kPa); Tmax = temperatura máxima (°C); Temperatura mínima (°C); R²aj = coeficiente ajustado de determinação do modelo; RMSE = erro médio quadrático.

CONTROLE = tratamento sem nenhum tipo de adubação; MINERAL 1 = adubação praticada pela empresa; MINERAL 2 = adubação recomendada por Raij et al. (1996); LE = o número que acompanha este prefixo representa o percentual relativo da dose, 50%, 100%, 150% ou 14,5, 29 e 43,5 Mg ha⁻¹ (base seca); P = dose de adubo fosfatado (supertriplo). 66% e 83% correspondem a 40 e 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅; B = 6,5 kg ha⁻¹ deste nutriente aplicado via ulexita; K = 165 kg ha⁻¹ de K₂O, desconsiderando o K presente no lodo, aplicado via KCl

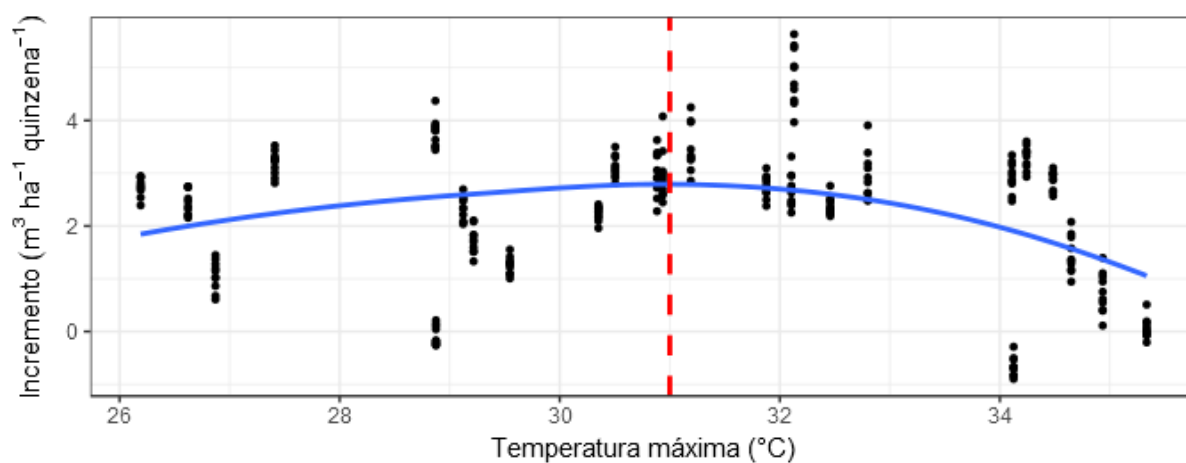
* = significativo ao nível de 0,05

** = significativo ao nível de 0,01

*** = significativo ao nível de 0,001

A análise do efeito da temperatura máxima demonstra efeito positivo sobre os incrementos com o aumento da temperatura até que se atinge o limite crítico ao redor dos 31° quando ocorre um efeito negativo mais acentuado (Figura 12). Esse comportamento é comumente observado em espécies arbóreas (PALLARDY, 2008).

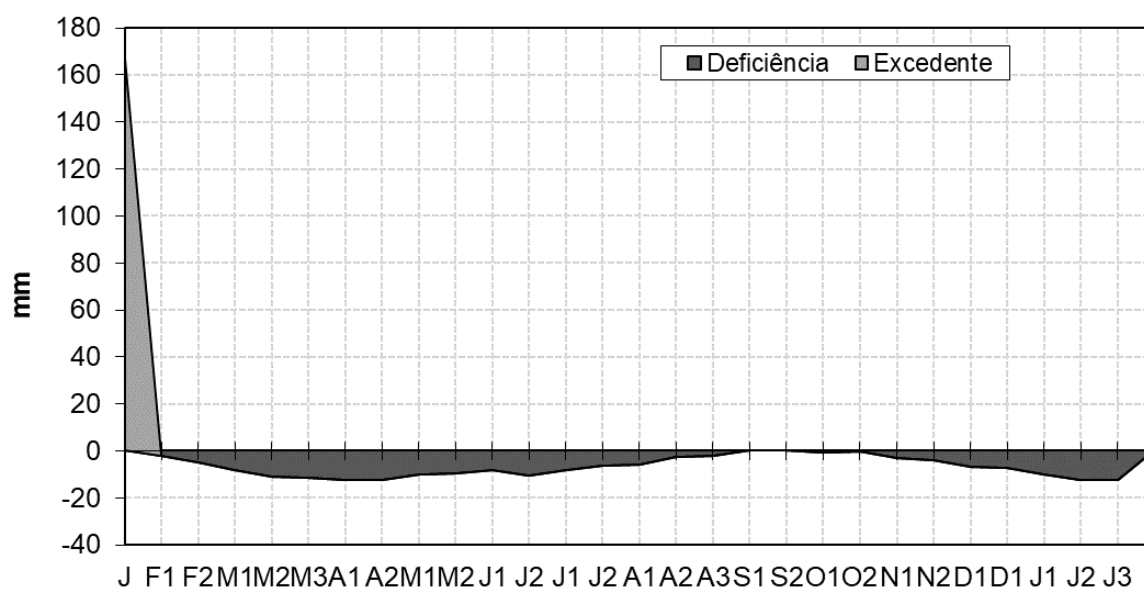
Figura 11– Efeito da temperatura máxima sobre o incremento quinzenal de volume



Fonte: o autor.

O déficit hídrico constatado ao longo das épocas de medição (Figura 13) pode explicar a baixa resposta dos tratamentos a adubação como também a pouca influência, constatada pela análise multivariada das demais variáveis meteorológicas. O elevado excedente observado em janeiro de 2017 se deve ao fato da CAD ter sido iniciado com 100% da capacidade, uma vez que não se dispunha deste dado para o período anterior.

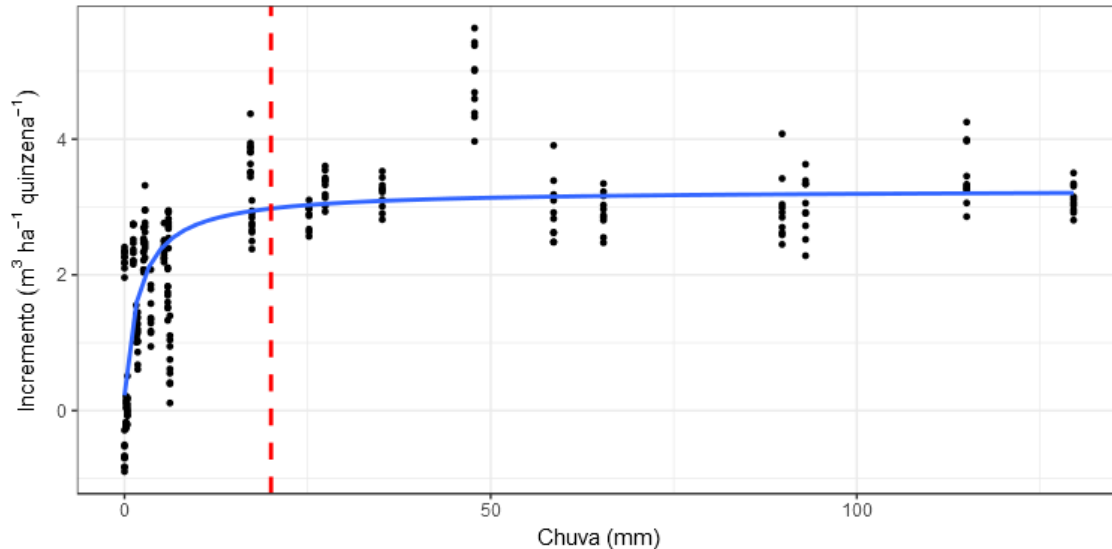
Figura 12– Balanço hídrico sequencial do local do experimento



Fonte: o autor.

A relação entre o incremento quinzenal e a chuva (Figura 14) mostrou que a partir de 25 mm de chuva acumulado na quinzena as plantas atingiram o máximo incremento. Essa situação evidencia o grande potencial de crescimento do eucalipto, que mesmo dispondo de solo com baixo conteúdo de água consegue apresentar expressivas taxas de incremento.

Figura 13– Incremento quinzenal de volume de madeira com casca, de todos os tratamentos, em relação a chuva ocorrida em cada período



Fonte: o autor.

A disponibilidade de água as árvores é o principal mecanismo de regulação da captura e eficiência de uso dos recursos fornecidos com grande influência sobre a variação do crescimento ao longo dos anos. Sem o adequado suprimento de água limita-se a expressão do potencial de crescimento das árvores. Esse fenômeno foi evidenciado por Stape, Binkley e Ryan (2008) e Ryan et al. (2010).

5. CONCLUSÕES

O tratamento LE50+P83-B+K apresentou melhor produtividade ao fim do período estudado, no entanto, essa diferença não é estatisticamente diferente dos demais tratamentos. A falta de diferenciação entre os tratamentos é decorrente do forte déficit hídrico observado ao longo do período estudado.

O incremento em volume das árvores varia ao longo do ano e é influenciado pelas variáveis meteorológicas. No entanto, os tratamentos não alteraram o padrão de resposta destas variáveis em relação às variáveis meteorológicas ao longo do período estudado.

É necessário realizar mais estudos de monitoramento com dendrômetros a fim de que se possa compreender melhor a influência das variáveis meteorológicas ao longo de toda a rotação. Possibilitando o contraste entre anos secos e aqueles com precipitação favorável ao crescimento.

REFERÊNCIAS

ABREU JUNIOR, C. H. et al. Fertilization using sewage sludge in unfertile tropical soils increased wood production in Eucalyptus plantations. **Journal of Environmental Management**, London, v. 203, p. 51-58, 2017.

ABREU JUNIOR, C. H. **Uso agrícola de lodo de esgoto em sistema florestal para produção de eucaliptos**. São Paulo: FAPESP, 2009. 106 p. (Relatório Científico Final. Processo n. ° 2004/15097-0).

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**, Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVARENGA, P. et al. Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. **Waste Management**, New York, v. 40, p. 44-52, 2015.

ALVARES, C. A. **Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de Eucalyptus no sul do Estado de São Paulo**. 2011. 280 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVARES, C. A.; CAMPOE, O. C., CARNEIRO, R. L.; MUNHOZ, J. S. B.; MATTOS, E. M.; DELIBERALI, I.; FERREZ, A. P. C.; STAPE, J. L. **Construção e uso de fitas dendrométricas para avaliação do ritmo de crescimento de árvores**. Piracicaba: IPEF, 2017. 17 p. (Circular Técnica, 212).

ANDRADE, C. A. de et al. Reciclagem de lodos de esgoto em solo agrícola: bases para revisão da legislação e recomendações de uso. In: FÓRUM DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DE PESQUISA: Avanços e Oportunidades. **Anais eletrônicos...** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2014. Disponível em: <<http://www.cnpma.embrapa.br/anais/forum/resumos/RE001.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

BERTON, R. S.; NOGUEIRA, T. A. R. Uso de lodo de esgoto na agricultura. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a Resolução n. 375 do CONAMA**. Botucatu: FEPAF, 2010.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. de. A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. de (Ed.). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. p. 25-36.

BETTIOL, W.; GHINI, R. Impacts of sewage sludge in tropical soil: a case study in Brazil. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2011, art. ID 212807, 11 p. 2011. DOI: 10.1155/2011/2128072011.

BOTOSSO, P. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Aplicação de faixas dendrométricas na dendrocronologia: avaliação da taxa e do ritmo de crescimento do tronco de árvores tropicais e subtropicais. In: MAIA, N. B.; MARTOS, H. L.; BARELLA, W. (Ed.). **Indicadores ambientais: conceitos e aplicações**. São Paulo: EDUC/COMPED/INEP, 2001. p. 145-171.

BOYD, A. W. Sewage farms as bird habitats. **British Birds**, East Sussex, v. 50, p. 253-263, 1957.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução N°. 375 de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, nº 167, 30 ago. 2006. Seção 1, p. 141-146.

CABARET, J. et al. The use of urban sewage sludge on pastures: the cysticercosis threat. **Veterinary Research**, London, v. 33, n. 5, p. 575-597, 2002.

CAMPOE, O. C. et al. Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 380, p. 149-160, 2016.

CASTRO, V. R. de et al. Efeito da disponibilidade hídrica e da aplicação de potássio e sódio no crescimento em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 113, p. 89-99, 2017.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA - CEPAGRI. **Clima dos Municípios Paulistas** – Boa Esperança do Sul. Campinas, 2017. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_076.html>. Acesso em: 10 out. 2017.

FACTURA, H. et al. Terra Preta sanitation: re-discovered from an ancient Amazonian civilization—integrating sanitation, bio-waste management and agriculture. **Water Science and Technology**, Oxford, v. 61, n. 10, p. 2673-2679, 2010.

FERRAZ, A. de V.; MOMENTEL, L. T.; POGGIANI, F. Soil fertility, growth and mineral nutrition in *Eucalyptus grandis* plantation fertilized with different kinds of sewage sludge. **New Forests**, Heidelberg, v. 47, n. 6, p. 861-876, 2016.

FERRAZ, A. de V.; POGGIANI, F. Biomass, nutrient and heavy metal in eucalyptus roots fertilized with different sewage sludge. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 311-320, 2014.

FERREIRA, M. Z. **Modelagem da influência de variáveis ambientais no crescimento e produção de Eucalyptus sp.** 2009. 101 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

FIDELES, J. C. A. **Oclusão da casca indica o início da formação de clear em árvores desramadas.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-05012017-175721/>>. Acesso em: 26 jan. 2018.

FIRME, L. P. **Produção de madeira e elementos potencialmente tóxicos no sistema solo-eucalipto tratado com lodo de esgoto**. 2009. 81 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

GODDARD, N. "A mine of wealth"? The Victorians and the agricultural value of sewage. **Journal of Historical Geography**, London, v. 22, n. 3, p. 274-290, 1996.

HAKAMADA, R. E. **Uso do inventário florestal como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em povoamentos clonais de *Eucalyptus***. 2012. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBA. Relatório 2017. São Paulo, 2018. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf. Acesso em: 09 jan. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Porcentagem de residentes nas zonas urbana e rural** (2015). Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://teen.ibge.gov.br/sobre-o-brasil/populacao/populacao-rural-e-urbana.html>. Acesso em: 10 jan. 2018.

LACLAU, J. P. et al. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 4, art. 243, 2013. DOI: 10.3389/fpls.2013.00243.

LACLAU, J. P.; GONÇALVES, J. L. M.; RANGER, J. Consequences of mineral fertilization and biosolid application on nutrient leaching over an entire rotation in Brazilian eucalypt plantations. In: IUFRO Anniversary Congress, 125., 2017, Baden-Württemberg. **Book of abstracts...** Baden-Württemberg: Forstliche Versuchs-und Forschungsanstalt (FVA) –IUFRO, 2017. p. 699.

LANDSBERG, J. Physiology in forest models: history and the future. **Forest Biometry, Modelling and Information Sciences - FBMIS**, London, v. 1, p. 49-63, 2003.

MATTOS, E. M. de. **Caracterização da sazonalidade do crescimento do lenho, da copa e da eficiência do uso da luz em clones do gênero *Eucalyptus***. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-20102015-164358/pt-br.php>. Acesso em: 26 jan. 2018.

MIKI, M. K.; ANDRIGUETI, E. J.; SOBRINHO, P. A. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos. In: _____. **Biossólidos na agricultura**. 2. ed. São Paulo: SABESP, 2001.

MOMENTEL, L. T. **Crescimento e eficiência no uso da água por clones de eucalipto sob doses de potássio**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-30092016-155249/pt-br.php>. Acesso em: 26 jan. 2018.

PALLARDY, S. G. **Physiology of woody plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2008.

POGGIANI, F.; GUEDES, M. C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de bio-sólido em plantações florestais: I. Reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. de (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2005. p. 163-178.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing v 3.3**. Vienna, 2016. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 09 jan. 2016.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

RAWAL, D. S. et al. Environmental effects on growth phenology of co-occurring *Eucalyptus* species. **International Journal of Biometeorology**, Leiden, v. 58, n. 4, p. 427-442, 2014.

RIMHANEN-FINNE, R. et al. Comparative analysis of *Cryptosporidium*, *Giardia* and indicator bacteria during sewage sludge hygienization in various composting processes. **Letters in Applied Microbiology**, Oxford, v. 38, n. 4, p. 301-305, 2004.

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 bio-sólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 623-639, 2004.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p. 33-137, 1998.

ROWLAND, L. et al. The sensitivity of wood production to seasonal and interannual variations in climate in a lowland Amazonian rainforest. **Oecologia**, Berlin, v. 174, n. 1, p. 295-306, 2014.

RYAN, M. G. et al. Factors controlling *Eucalyptus* productivity: how water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1695-1703, 2010.

SETTE JUNIOR, 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**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 979-990, 2010.

SETTE JUNIOR, C. R. et al. Sazonalidade do incremento em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis* pelo uso de dendrômetros. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 763-775, 2012.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO DE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2015**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2015>>. Acesso em: 12 jan. 2018.

SOBRINHO, P. A. Tratamento de esgoto e geração de lodo. In: TSUTIYA, M. Y. et al. (Ed.). **Biossólidos na agricultura**. 2. ed. São Paulo: SABESP, 2002.

SPURR, S. **Forest inventory**. New York: The Ronald Press, 1952.

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**, Amsterdam, v. 255, n. 3-4, p. 920-930, 2008.

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**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. (Publications in Climatology).

TUCCI, C. E. M. Urban waters. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

USEPA. **Method 3051a**: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils. Revision 1. Washington, DC, 2007. 30 p.

VAZ, L. M. S.; GONÇALVES, J. L. M. Uso de biossólidos em povoamento de eucalipto: efeito em atributos químicos do solo, no crescimento e na absorção de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p. 747-758, 2002.