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

**Adaptação do modelo da zona agroecológica para a estimação do
crescimento e produtividade de eucalipto**

Cleverson Henrique de Freitas

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2018**

Cleverson Henrique de Freitas
Bacharel em Ciências Atmosféricas

**Adaptação do modelo da zona agroecológica para a estimação do crescimento e
produtividade de eucalipto**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **PAULO CESAR SENTELHAS**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

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

Freitas, Cleverson Henrique de

Adaptação do modelo da zona agroecológica para a estimação do crescimento e produtividade de eucalipto / Cleverson Henrique de Freitas. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

155 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Modelos de simulação 2. Produtividade potencial 3. Produtividade atingível
4. Qubras de produtividade 5. ENOS I. Título

AGRADECIMENTOS

Neste momento de alívio e sensação de dever cumprido, não posso deixar de agradecer àqueles que foram essenciais para que este trabalho fosse realizado!

Agradeço primeiramente a Deus e à espiritualidade pelo conforto, principalmente nos momentos de tristeza e desânimo!

Aos meus pais Bernadete e Nelson, meus irmãos Cleber, Cristina, Cristiane e Cleide, meus sobrinhos e meus cunhados Hélber, Nívea e Edimi por darem todo apoio e incentivo que vem desde criança e aumenta a cada dia!

Ao Prof. Dr. Paulo Cesar Sentelhas, pelos ensinamentos, pela paciência e por todo suporte técnico e científico durante todo o trabalho!

À Piracicaba, cidade tão acolhedora e que me trouxe amigos tão especiais que eu guardo com muito carinho! Muito obrigado Flávio, Ana, Rodrigo, Luiza, Débora, Jéssica, Thuane e república Piracicasa (Jordana, Mitch, Bruno e Rafael) pela paciência, pelo incentivo, pelo ombro amigo nas horas que mais precisei e pelas festas sempre divertidas e cheias de histórias!

À minha segunda família CAT2011 (Amanda, Bruno, Carolina, Débora, Diego, Heloisa, Igor, Josielli, Rebeca, Rodolfo e a agregada Thais), obrigado pelo carinho, pelo incentivo, pelo apoio emocional e técnico que já dura oito anos e tenho certeza que ainda teremos muitas e muitas histórias pela frente!

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela oportunidade e confiança durante o período da consultoria, em especial aos colegas de trabalho que se tornaram grandes amigos e que levarei para sempre comigo. Muito obrigado Danielle, Naiane, Márcia, Mozar, Luiz André, Wallace, Rayanne, Camila e Felipe, pelo acolhimento tão bom, pela confiança no meu trabalho, e por me mostrarem que posso sim ser um excelente agrometeorologista, muito obrigado!

Aos colegas da Cúpula, em especial ao meu coorientador Elvis, à minha irmãzona Maiara e à Fabiani pela paciência, amizade e companhia nos momentos mais quentes daquela cúpula.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ao Departamento de Engenharia de Biossistemas e aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela oportunidade e troca de conhecimento essenciais para minha formação.

Ao Luan por ter tanta paciência e perder tantas horas me ensinando a programar, ao César pela imensa ajuda na plotagem dos mapas desta dissertação e ao Ricardo pela ajuda na revisão bibliográfica, sou eternamente grato.

Ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) por meio do programa TECHS e às empresas parceiras pela disponibilidade dos dados que foram cruciais para a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos durante o período do Mestrado.

Meus sinceros agradecimentos a todos que aqui não foram citados, mas que de alguma forma estiveram presentes nos momentos mais importantes e decisivos durante esse tempo de mestrado.

“LE COSE SONO UNITE DA LEGAMI INVISIBILI.
NON PUOI COGLIERE UN FIORE SENZA TURBARE
UNA STELLA.”
(GALILEO GALILEI)

“EU ACREDITO EM PROFUNDIDADES
E TENHO MEDO DE ALTURA, MAS NÃO EVITO MEUS ABISMOS.
SÃO ELES QUE ME DÃO A DIMENSÃO DO QUE SOU!”
(MARLA DE QUEIROZ)

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO GERAL	9
REFERÊNCIAS.....	11
2. ADAPTAÇÃO, CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO DA ZONA AGROECOLÓGICA PARA A ESTIMAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO	13
RESUMO.....	13
ABSTRACT	13
2.1. INTRODUÇÃO	14
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	16
2.2.1. Dados de Produtividade do eucalipto	16
2.2.2. Dados meteorológicos	19
2.2.3. Adaptação e calibração do modelo da Zona Agroecológica da FAO para a estimativa da produtividade do eucalipto	20
2.2.4. Estimação da produtividade potencial (PP) e atingível (PA)	21
2.2.5. Produtividade atingível (PA).....	24
2.2.6. Calibração dos coeficientes k_c e k_y e inclusão de funções de penalização por déficit hídrico e ocorrência de geada.....	24
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
2.3.1. Adaptação e calibração do modelo.....	25
2.3.2. Estimação das produtividades potencial (PP) e atingível (PA)	30
2.4. CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS	42
3. DETERMINAÇÃO DAS QUEBRAS DE PRODUTIVIDADE (<i>YIELD GAPS</i>) DA CULTURA DO EUCALIPTO – ESTUDO DE CASO PARA REGIÕES PRODUTORAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL	49
RESUMO.....	49
ABSTRACT	49
3.1. INTRODUÇÃO	50
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	53
3.2.1. Local de estudo	53
3.2.2. Dados meteorológicos	55
3.2.3. Estimação da produtividade potencial (PP) e atingível (PA)	56
3.2.4. Quebras de produtividade ou <i>Yield Gaps</i> do eucalipto.....	57
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
3.4. CONCLUSÕES	72
REFERÊNCIAS	72
4. IMPACTOS DO FENÔMENO EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL NA VARIABILIDADE CLIMÁTICA E SUA INFLUÊNCIA NA PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO, NO BRASIL	77
RESUMO.....	77
ABSTRACT	77
4.1. INTRODUÇÃO	78
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	81
4.2.2. Estimação da produtividade potencial (PP) e atingível (PA)	83
4.2.3. Avaliação do crescimento do eucalipto em eventos de ENOS	87
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	89
4.3.1. Efeito do ENOS no clima	89
4.3.2. Efeito do ENOS na produtividade do eucalipto	99
4.4. CONCLUSÕES	127
REFERÊNCIAS	128
APÊNDICES	135

RESUMO

Adaptação do modelo da zona agroecológica para a estimação do crescimento e produtividade de eucalipto

Dentre as espécies florestais, o *Eucalyptus* é o gênero florestal mais plantado no Brasil, com aproximadamente 7,8 milhões de hectares, tendo grande importância econômica para o país. Desta maneira, é importante um melhor conhecimento e quantificação dos fatores que condicionam e reduzem o crescimento e a produtividade das florestas. Assim, este estudo teve por objetivos: i) adaptar, calibrar e avaliar o Modelo da Zona Agroecológica (MZA-FAO) para a estimação do crescimento e da produtividade de oito clones de eucalipto em diferentes regiões brasileiras; ii) determinar a magnitude e as principais causas das quebras de produtividade (yield gaps) da cultura do eucalipto em diferentes regiões produtoras do estado de Minas Gerais; e iii) avaliar a influência de eventos de El Niño, La Niña e Neutros na produtividade de eucaliptos em diferentes localidades produtoras do Brasil. Foram adaptados e calibrados os coeficientes do MZA-FAO, como a correção para o índice de colheita (C_c), o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (k_y), as curvas características de índice de área foliar (IAF), crescimento radicular (Z_r) e coeficiente de cultura (k_c), além da inclusão de funções de penalização da produtividade do eucalipto por ocorrência de eventos de geada (f_{frost}) e mortalidade por longos períodos de deficiência hídrica (f_{wd}). A inclusão das funções de penalização e a calibração dos coeficientes resultaram em uma melhora significativa no desempenho (acurácia e precisão) do modelo, com a REQM passando de $110 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, na fase inicial de calibração, para $39 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, na fase final de calibração, R^2 passando de 0,73 para 0,82 e índice de erro de 0,70 para 0,93. Com relação às quebras de produtividade, a deficiência hídrica foi o principal fator de quebra de produtividade, correspondendo a 77% da quebra total (Q_T), enquanto que as perdas decorrentes do déficit de manejo corresponderam a 23% da Q_T . Para avaliar o crescimento do eucalipto em eventos de ENOS, no período de 1983 a 2016, foi considerado o Incremento Corrente Anual (ICA) no período de máximo crescimento, ou seja, no 3º ano de seu ciclo. As produtividades e as perdas de produtividade do eucalipto durante a atuação dos eventos de ENOS mostraram-se amplamente variáveis tanto espacialmente quanto temporalmente, como consequência dos diferentes regimes térmicos e hídricos das regiões produtoras, não sendo observado um padrão claro para a relação ENOS e produtividade do eucalipto em diferentes regiões brasileiras avaliadas.

Palavras-chave: Modelos de simulação; Produtividade potencial; Produtividade atingível; Quebras de produtividade; ENOS

ABSTRACT

Adaptation of the agroecological zone model to estimate eucalyptus growth and yield

Among the forest species, the *Eucalyptus* is the most planted one in Brazil, with approximately 7.8 million hectares, having a huge economic importance for the country. Therefore, a better knowledge and quantification of the factors that affect forests growth and yield is of high important. Based on that, this study had as objectives: i) to adapt, calibrate and evaluate the Agroecological Zone Model (AEZ-FAO) to estimate growth and yield of eight eucalyptus clones in different Brazilian producing regions; ii) to identify the magnitude and major causes of yield gaps of eucalyptus in different producing regions of Minas Gerais state, Brazil; and iii) to identify the influence of El Niño, La Niña and Neutral events on eucalyptus yield in 12 Brazilian producing regions. The model's coefficients, such as correction for the harvest index (C_c), water deficit sensitivity index (k_y), leaf area index curve (LAI), root growth curve (Z_r) and crop coefficient (k_c), were calibrated. Penalization functions for considering the occurrence of frost events (f_{frost}) and mortality by long periods of accumulated water deficit (f_{wd}) were also included in the model. The calibration and adaptation of the model resulted in a significant improvement of its performance (accuracy and precision), for both calibration and evaluation phases. The RMSE was $110 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in the initial phase of calibration while in the final phase, RMSE was reduced to $39 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, the R^2 was increase from 0.73 to 0.82, and the agreement index (d) was also improved going from 0.70 to 0.93. In relation to the yield gaps, the water deficit was the main factor of yield reduction, corresponding to 77% of the total yield gap (YG_T), while losses due to sub-optimum management corresponded to 23% of YG_T . In order to evaluate the eucalyptus growth under different ENSO events, from 1983 to 2016, the Current Annual Increment (CAI) in the period of maximum growth, 3rd year of the cycle, was used. The eucalyptus yield and yield gap during the ENSO events were widely variable both spatially and temporally as a consequence of the different thermal and water regimes of the producing regions. It was not possible to identify a clear pattern thee relationship between ENSO and eucalyptus yield in the different Brazilian regions assessed.

Keywords: Simulation models; Potential yield; Attainable yield; Yield gaps; ENSO

1. INTRODUÇÃO GERAL

O gênero *Eucalyptus*, pertencente à família Myrtaceae (PRYOR, 1976), tem sua origem no continente australiano e regiões próximas, como Timor, Indonésia, Papua-Nova-Guiné, Molucas, Irian Jaya e sul das Filipinas, distribuídas entre as altitudes de 30 a 2.000 m e latitudes de 13° a 44° S (ELDRIDGE; CROMER, 1987; MARCHIORI; SOBRAL, 1997). Atualmente, existem cerca de 500 a 700 espécies e variedades de eucalipto, espalhadas pelas mais variadas condições climáticas (BERTOLUCCI; REZENDE; PENCHEL, 1995).

No Brasil, o *Eucalyptus* é o gênero florestal mais plantado, com aproximadamente 7,5 milhões de hectares, correspondendo a 75% das áreas de florestas plantadas, e manejado intensivamente principalmente para a obtenção dos produtos como polpa celulósica, papel, madeira para serraria e geração de energia (ABRAF, 2013; IBGE, 2017). Em 2016, da área plantada com *Eucalyptus* no Brasil, 41,5% estava concentrada na região Sudeste do país, seguida pelas regiões Sul (22,3%), Centro-Oeste (17,5%), Nordeste (11,9%) e Norte (6,8%). Na região Sudeste, o estado de Minas Gerais merece destaque por ser aquele com maior área plantada com espécies do gênero *Eucalyptus*, correspondendo a 1.839.459 ha, ou seja, 24% da área brasileira de florestas de eucaliptos plantada (IBÁ, 2017; IBGE, 2017).

Dentre as características que contribuem para que o eucalipto se destaque entre os gêneros florestais no Brasil estão: o rápido crescimento, a alta produtividade, sua razoável adaptação a diferentes condições climáticas, além de possuir características silviculturais desejáveis como tronco retilíneo, bom rendimento, facilidade para trabalho em programas de melhoramento genético, entre outras (MORA; GARCIA, 2000; SILVA, 2011; REZENDE; PEREIRA; BOTELHO, 2013).

Além disso, o potencial produtivo de eucalipto é fortemente influenciado pelas condições edáficas, como: profundidade do solo, teor de matéria orgânica e conteúdo de argila e climáticas, como: radiação solar, temperatura do ar e precipitação do local e sua variabilidade temporal e espacial (RIBEIRO et al., 2009). Altas temperaturas favorecem a produção de eucalipto, enquanto que temperaturas abaixo de 10°C desaceleram o crescimento e desenvolvimento da cultura, sendo que quando há ocorrência de geada, vários danos são causados nas árvores de eucalipto, como queima ou bronzeamento da folhagem. Além da radiação e temperatura, a chuva é um fator determinante na produtividade de eucalipto, devido principalmente à sua variabilidade espacial e temporal. Em boas condições de disponibilidade hídrica do solo, existe uma correlação direta entre o total de água transpirada e o ganho de biomassa (RIBEIRO et al., 2009). Em relação à variabilidade climática, uma das

principais causas dela é o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), o qual é marcado pelo forte acoplamento oceano-atmosfera que gera impactos significativos no clima do Atlântico e da América do Sul (GRIMM, 2004), impactando o crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas agrícolas e florestais.

Nesse contexto, o uso de modelos de simulação se torna uma ferramenta fundamental para a avaliação das respostas das florestas plantadas às variações das condições de tempo, ao longo do ciclo (RASCON, 2012). Os modelos de simulação de culturas permitem estimar a produtividade ao longo do ciclo das espécies florestais, por meio da simulação da dinâmica natural de um povoamento, sob o efeito de distintos fatores físicos e bióticos (TOMÉ, 1991; VANCLAY, 1994; MARTINS, 2011). A escolha do melhor modelo a ser utilizado na estimação da produtividade florestal depende principalmente das variáveis disponíveis para a sua calibração, avaliação e nível de detalhamento e acurácia desejados (TAYLOR; CHEN; VANDAMME, 2009).

Dentre os modelos de simulação, tem-se o Modelo da Zona Agroecológica também conhecido como Modelo FAO (MZA) que foi descrito por Doorenbos e Kassam (1994) e objetiva a estimativa da produtividade potencial (PP) e atingível (PA) de uma cultura. A PP pode ser entendida como sendo aquela obtida por uma variedade altamente produtiva e bem adaptada ao ambiente, sem restrições hídricas, nutricionais e fitossanitárias, enquanto a PA leva em conta, além dos fatores determinantes (genótipo, população de plantas, temperatura do ar, radiação solar e fotoperíodo), o efeito do déficit hídrico durante o ciclo da cultura (DOORENBOS; KASSAM, 1994; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

Com base nisso, a hipótese geral deste estudo é de que o modelo MZA-FAO, desde que adaptado para o eucalipto e, posteriormente, calibrado e avaliado com dados independentes, poderá gerar estimativas confiáveis da produtividade dessa cultura, auxiliar na determinação dos fatores causais das perdas de produtividade e permitir o entendimento da influência da variabilidade climática na produtividade do eucalipto no Brasil.

Assim, para testar tal hipótese, este estudo teve por objetivos específicos: adaptar, calibrar e avaliar o MZA-FAO para a estimação do crescimento e produtividade de oito clones de eucalipto em diferentes regiões brasileiras; determinar a magnitude e as principais causas das quebras de produtividade (yield gaps) da cultura do eucalipto em diferentes regiões produtoras do estado de Minas Gerais; e avaliar a influência de eventos de El Niño, La Niña e anos Neutros na produtividade de eucaliptos em diferentes localidades produtoras do Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas 2013: ano base 2012.** Disponível em: <<http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/anuario-ABRAF13-BR.pdf>>. Acesso em: 1 mar. 2016.
- BERTOLUCCI, F.; REZENDE, G.; PENCHEL, R. Produção e utilização de híbridos de eucalipto. **Silvicultura**, v. 51, p. 12–16, 1995.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas.** Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306p.
- ELDRIDGE, K.; CROMER, R. N. Adaptation and physiology of eucalypts in relation to genetic improvement. In: Simposio sobre Silvicultura y Mejoramiento Genético de Especies Forestales, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: CIEF, 1987.
- GRIMM, A. M. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? **Climate Dynamics**, v. 22, n. 2–3, p. 123–138, 2004.
- IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2017.** 80 p.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura.** Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=5930&z=t&o=29>>. Acesso em: 1 mar. 2016.
- MARCHIORI, J. N. C.; SOBRAL, M. **Dendrologia das angiospermas – myrtales.** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1997.
- MARTINS, F. B. **Modelagem e crescimento em nível de árvore individual para plantios comerciais de eucaliptos.** 2011. 143f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- MORA, A.; GARCIA, C. **A cultura do eucalipto no Brasil.** Sociedade Brasileira de Silvicultura. 112p.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Condicionamento Climático da Produtividade Potencial. In: **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas.** Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.
- PRYOR, L. D. **The biology of eucalyptus.** 61. ed. Londres: London Edward Arnold, 1976.

- RASCON, N. J. L. **Modelagem ecofisiológica do desenvolvimento do eucalipto na amazônia**. 2012. 78f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- REZENDE, J. B.; PEREIRA, J. R.; BOTELHO, D. de O. Expansão da cultura do eucalipto nos municípios mineiros e gestão territorial. **Revista Cerne**, v. 19, n. 1, p. 1-7, 2013.
- RIBEIRO, A.; PAIVA, Y. G.; BAESSO, R. C. E.; ALMEIDA, A. Q. de; OLIVEIRA, A. S. de; OLIVEIRA, R. A. de; HAMAKAWA, P. J.; SILVA, M. P. Eucalipto. In: **Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. 1. ed. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 2009. p. 407-423.
- SILVA, J. C. **Manual prático do fazendeiro florestal. produzindo madeira com qualidade**. Viçosa: Editora UFV, 2011.
- TAYLOR, A. R.; CHEN, H. Y. H.; VANDAMME, L. A Review of Forest Succession Models and Their Suitability for Forest Management Planning. **Forest Science**, v. 55, n. 1, p. 23–36, 2009.
- TOMÉ, M. Os modelos da Produção Florestal na Gestão dos Povoamentos Florestais. **Revista Agros**, v. 8, n. 2, p. 32–36, 1991.
- VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests**. Copenhagen: CAB International, 1994.

2. ADAPTAÇÃO, CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO DA ZONA AGROECOLÓGICA PARA A ESTIMAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO

Resumo

Os modelos de simulação permitem prever a produtividade ao longo do tempo das espécies florestais e agrícolas. Entre eles, tem-se o Modelo da Zona Agroecológica (MZA-FAO), classificado como modelo fisiológico-matemático, já que emprega uma base fisiológica para a estimação da produtividade potencial (PP) e uma aproximação empírica para descrever o efeito do déficit hídrico para a estimação da produtividade atingível (PA). Dentre as espécies florestais, o *Eucalyptus* é o gênero florestal mais plantado no Brasil, com aproximadamente 7,44 milhões de hectares, tendo grande importância econômica. Considerando-se a importância dessa espécie florestal e das condições meteorológicas em seu crescimento, o objetivo deste estudo foi adaptar, calibrar e avaliar o MZA-FAO para a estimação da produtividade de clones de eucalipto em diferentes regiões produtoras brasileiras. Para isso, foram utilizados dados de inventários florestais de 23 sítios e 8 clones (classificados como plásticos - P, tropicais - T, e subtropicais - S) de eucalipto distribuídos nas diferentes regiões produtoras pertencentes às empresas florestais parceiras do projeto TECHS (*Programa Cooperativo sobre Tolerância de Eucalyptus Clonais aos Estresses Hídrico, Térmico e Biótico*) no período 2011-2017. Foram adaptados e calibrados os coeficientes do modelo, como a correção para o índice de colheita (Cc), o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (ky), as curvas características de índice de área foliar (IAF), crescimento radicular (Zr) e coeficiente de cultura (kc), além da inclusão de funções de penalização da produtividade de eucaliptos por ocorrência de eventos de geada (f_{frost}) e mortalidade por longos períodos de deficiência hídrica (f_{wd}). A inclusão das funções de penalização e a calibração dos coeficientes resultaram em uma melhora significativa no desempenho (acurácia e precisão) do modelo, com a REQM passando de cerca de 110,0 m³ ha⁻¹, na fase inicial de calibração, para aproximadamente 39,0 m³ ha⁻¹, na fase final de calibração. A calibração também possibilitou melhora tanto na precisão, com R² passando de 0,73 para 0,82, quanto na acurácia, com índice d indo de 0,70 para 0,93. O modelo, segundo a classificação pelo índice de confiança (c), passou de fraco (c = 0,59) para muito bom (c = 0,84), apresentando na avaliação com dados independentes um desempenho ainda melhor, sendo classificado como ótimo (c = 0,87). Em geral, o modelo simulou melhor as produtividades dos clones tropicais e subtropicais do que a dos clones plásticos. O modelo MZA-FAO adaptado à cultura do eucalipto apresentou também desempenho satisfatório na estimação temporal do volume do fuste do eucalipto, sendo uma ferramenta útil para estudos dos impactos do clima e sua variabilidade na produtividade do eucalipto em diferentes regiões brasileiras e para clones tropicais, subtropicais e plásticos.

Palavras-chave: Modelos de simulação; Produtividade potencial; Produtividade atingível; Calibração; Avaliação; Risco climático

Abstract

The crop simulation models can predict yield over time of forests and crop species. Among these crop models, there is the Agroecological Zone Model - FAO (AEZ), which is classified as a physiological-mathematical model, since it uses a physiological basis for estimating potential yield (Yp) and empirical approach to simulate water deficit effect to estimate attainable yield (Ya). Among the forest species, the *Eucalyptus* is the most planted

one in Brazil, with approximately 7.44 million hectares, having a huge economic importance. Considering the importance of this forest species and the influence that weather conditions have on its growth, the aim of this study was to adapt, calibrate and evaluate the AEZ to estimate the eucalyptus productivity in different Brazilian producing regions. For this, forest inventory data from 23 sites and 8 eucalyptus clones (classified as plastics - P, tropical - T and subtropical - S) distributed in the different Brazilian producing regions, belonging to the forest companies partners of the “Tolerance of Eucalyptus Clones to Hydric, Thermal and Biotic Stresses” (TECHS) project, for the period 2011-2017, were used. The model coefficients, such as correction for the harvest index (C_c), the water deficit sensitivity index (k_y), the leaf area index curve (LAI), root growth curve (Z_r) and crop coefficient (k_c), were calibrated. Penalization functions of eucalyptus yield due to the occurrence of frost events (f_{frost}) and mortality by long periods of accumulated water deficit (f_{wd}) were also included. The calibration and adaptation of the model resulted in a significant improvement of its performance (accuracy and precision), for both calibration and evaluation phases. The RMSE value was approximately $110.0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in its initial calibration phase while in the final calibration phase, the RMSE value was approximately $39.0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. The calibration also allowed improvements in precision, with R^2 going from 0.73 to 0.82, as well as in accuracy, with agreement index (d) increasing from 0.70 to 0.93. The model, according to the confidence index (c) classification, changed from weak ($c = 0.59$) to very good ($c = 0.84$), during the calibration process, whereas in the evaluation with independent data it presented a better performance, being classified as great ($c = 0.87$). In general, the model better simulated the yields of tropical and subtropical clones than the yields of plastic ones. The AEZ-FAO model adapted to the eucalyptus crop presented satisfactory performance in the temporal estimation of the eucalyptus volume, being a useful tool for studies of climate impacts and their variability on yield in different Brazilian regions and for tropical, subtropical and plastics clones.

Keywords: Simulation models; Potential yield; Attainable yield; Calibration; Validation; Climatic risk

2.1. Introdução

Os modelos de crescimento e produtividade de espécies florestais são ferramentas que auxiliam na integração dos efeitos das condições meteorológicas, tipo de solos e de práticas de manejo florestal, permitindo a realização de diversos estudos para o entendimento do desempenho das florestas plantadas em diferentes condições edafoclimáticas, auxiliando no planejamento e nas tomadas de decisão (JONES et al., 2003). Estes modelos podem ser divididos em três tipos, sendo: modelos empíricos, baseados na simples relação entre dados climáticos e produtividade; modelos estocásticos, onde o processo é descrito por funções de probabilidade; e modelos mecanísticos ou baseados em processos, que consideram as leis físicas, químicas e biológicas que governam os processos das plantas (LEMOS, 2012).

No caso do eucalipto, os modelos empíricos são utilizados para a estimação da produtividade dos plantios, estimando o crescimento em volume ou biomassa por meio de variáveis dendrométricas durante todo o ciclo da cultura (LEMOS, 2012). Já os modelos

mecanísticos determinam a produtividade por meio da simulação dos processos vitais para o crescimento e desenvolvimento das árvores, incluindo os efeitos dos regimes térmico, hídrico e nutricional nos diferentes processos biológicos, levando esses modelos a serem denominados de ecofisiológicos (JOHNSEN et al., 2001).

Diversos modelos baseados em processos ecofisiológicos têm sido idealizados para estimar a produtividade de povoamentos florestais, entre eles destacam-se os modelos 3-PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*) (LANDSBERG; WARING, 1997), APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*) (MCCOWN et al., 1996), CABALA (*CARbon BALAnce*) (BATTAGLIA et al., 2004), Forest-DNDC (LI et al., 2000) e PROMOD (BATTAGLIA; SANDS, 1997). Além desses modelos, o Modelo da Zona Agroecológica (MZA), conhecido como Modelo FAO (DOORENBOS E KASSAM, 1994), também tem potencial para ser empregado para estimar a produtividade de espécies florestais. Esse modelo tem como objetivo estimar a produtividade potencial (PP) de uma cultura, e a partir dela determinar a produtividade atingível (PA), por meio da penalização da PP pelo déficit hídrico que ocorre em cada fase da cultura. A PP é a produtividade obtida por um genótipo altamente produtivo e bem adaptado ao ambiente de produção, sem que haja restrições de ordem hídrica, nutricional e fitossanitária, sendo assim, função apenas da interação entre o genótipo e os dos fatores determinantes, como, temperatura do ar, radiação solar, fotoperíodo e duração do período total de crescimento da cultura (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

O MZA-FAO é baseado no modelo teórico de De Wit (1965), em que a produtividade bruta de matéria seca de uma cultura padrão hipotética, cobrindo todo o terreno, é função da radiação solar, temperatura do ar e fotoperíodo. Sendo assim, torna-se necessária a introdução de correções para que as adaptações para culturas agrícolas e florestais sejam feitas, tais como a correção para os processos relativos à respiração de manutenção, índice de área foliar, índice de colheita e teor de água na parte colhida, além da ponderação da redução da produtividade causada pelo déficit hídrico, levando a PA (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

O acúmulo de matéria seca no modelo MZA-FAO é sempre maior em dias de céu claro do que em condições de céu nublado, devido não apenas à maior disponibilidade de energia radiante, mas também à maior capacidade de absorção de radiação pelas folhas quando há maior proporção de radiação direta, resultando em uma maior taxa fotossintética (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). O coeficiente relativo à respiração de manutenção é fortemente dependente da temperatura do ar, e quanto maior for a temperatura, maior será a perda de carboidratos produzidos pelo processo respiratório. A correção para o

índice de área foliar é utilizada para corrigir a interceptação de radiação solar com base no valor do índice de área foliar (IAF) máximo para determinada cultura (BATTISTI, 2013). Já o índice de colheita representa a relação entre a matéria seca da parte colhida e a matéria seca total da cultura, seja na forma de grão, fibra, fruto, madeira ou açúcar. Finalmente, a correção para o teor de água na parte colhida serve para incorporar na produtividade final o peso da água presente no órgão da planta de interesse.

Para avaliar o efeito do déficit hídrico, fator esse associado ao fechamento estomático e redução da fotossíntese, o que afeta diretamente o crescimento e a produtividade das culturas, o modelo utiliza o balanço hídrico e a época de ocorrência da deficiência hídrica. A deficiência hídrica pode ser caracterizada pela relação entre a evapotranspiração real (E_{Tr}) e a evapotranspiração de cultura (E_{Tc}), sendo que E_{Tr}/E_{Tc} representa a evapotranspiração relativa e $(1 - E_{Tr}/E_{Tc})$ representa o déficit hídrico relativo. Sempre que $(1 - E_{Tr}/E_{Tc})$ for maior do que zero, haverá deficiência hídrica e quanto maior for esse déficit, maior a penalização da produtividade da cultura (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

A escolha do melhor modelo a ser utilizado na estimação da produtividade de espécies florestais depende principalmente das informações disponíveis para a sua calibração e avaliação, e do nível de detalhamento e acurácia desejados pelo usuário (TAYLOR; CHEN; VANDAMME, 2009). Sendo assim, qualquer modelo de simulação que produza resultados compatíveis com a realidade do local e da cultura, independentemente de sua complexidade, poderá ser empregado com segurança (DIAS, 2016).

Com base nisso, a hipótese deste estudo é de que o modelo MZA-FAO, desde que adaptado à cultura do eucalipto, calibrado e avaliado com dados independentes, poderá gerar estimativas confiáveis da produtividade dessa cultura. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi adaptar, calibrar e avaliar o MZA-FAO para a estimação do crescimento e produtividade de oito clones de eucalipto em diferentes regiões brasileiras.

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Dados de Produtividade do eucalipto

Os locais de coleta dos dados de produtividade do eucalipto correspondem a 23 sítios (Tabela 2.1) pertencentes a 26 empresas florestais parceiras do *Programa Cooperativo sobre Tolerância de Eucalyptus Clonais aos Estresses Hídrico, Térmico e Biótico*, conhecido como TECHS, abrangendo todas as regiões produtoras de eucalipto do Brasil. O objetivo principal

deste programa é investigar os principais estresses ambientais (hídrico e térmico) que afetam a eucaliptocultura, considerando-se distintos materiais genéticos e como eles respondem ecofisiologicamente a esses estresses (BINKLEY et al., 2017).

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima dos sítios utilizados neste estudo é bastante diversificado (Figura 2.1), variando entre climas tropicais (Am – clima tropical de monção, As – clima tropical úmido com estação seca de verão e Aw – clima tropical úmido com estação seca de inverno) a climas subtropicais sem estação seca (Cfa – clima subtropical úmido com verão quente e Cfb – clima subtropical úmido com verão moderadamente quente) e subtropicais com estação seca de inverno (Cwa – clima subtropical úmido com verão quente) (ALVARES et al., 2013).

Foram utilizados oito dos 18 clones pertencentes ao projeto TECHS considerando ciclo de cultivo médio de seis anos. Estes clones foram escolhidos com o objetivo de se ter uma maior variabilidade genética e suscetibilidade aos estresses térmicos e hídricos. Assim, os clones foram classificados em três tipos, sendo eles: clones plásticos (A1 - *E. urophylla* x *sp*, C3 - *E. grandis* x *E. camaldulensis*, K2 - *E. saligna* e Q8 - *E. grandis* x *sp*), estes que foram plantados em todos os sítios, tropicais (B2 - *E. urophylla* x *E. grandis* e R9 - *E. urophylla*) e subtropicais (N5 - *E. dunnii* e O6 - *E. grandis*), sendo estes restritos a classificação climática de cada sítio.

Tabela 2.1. Características das localidades (estado, latitude, longitude e altitude e capacidade de água disponível para 3 m de perfil de solo) nas quais foram obtidos dados de produtividade de eucalipto junto ao programa TECHS.

Sítio	Código TECHS	Localidade	Estado	Lat	Lon	Alt m	CAD (3m)
				Graus (°)			mm
1	18	São Gabriel	RS	-30,34	-54,32	102	272
2	23	Otacílio Costa	SC	-27,53	-50,10	870	335
3	28	Três Barras	SC	-26,11	-50,21	812	379
4	27	Antônio Olinto	PR	-25,98	-50,11	916	233
5	2	Arapoti	PR	-24,21	-49,97	770	410
6	22	Telêmaco Borba	PR	-24,23	-50,53	888	358
7	24	Borebi	SP	-22,73	-49,00	656	194
8	10	Botucatu	SP	-23,03	-48,53	869	274
9	33	Buri	SP	-23,85	-48,70	695	383
10	20	Mogi Guaçu	SP	-22,35	-46,97	633	271
11	11	Chapadão do Sul	MS	-18,71	-52,59	783	254
12	14	Inocência	MS	-19,96	-51,59	480	230
13	13	Três Lagoas	MS	-20,90	-51,90	361	248
14	4	Belo Oriente	MG	-19,31	-42,42	243	221
15	30	Bocaiúva	MG	-17,32	-43,77	848	163
16	3	Bom Despacho	MG	-19,70	-45,41	727	177
17	26	Coração de Jesus	MG	-16,78	-44,31	926	193
18	9	Estrela do Sul	MG	-18,73	-47,92	969	195
19	5	Guanhães	MG	-18,58	-42,93	873	357
20	1	Niquelândia	GO	-14,34	-48,73	545	271
21	7	Rio Verde	GO	-18,02	-50,90	681	194
22	19	Peixe	TO	-12,17	-48,50	255	293
23	8	Inhambupe	BA	-11,86	-38,37	218	136

Cada clone foi plantado em uma única parcela (24 x 90 m), com 8 linhas × 30 árvores e espaçamento de árvores de 3 × 3 m, e cada parcela possuía 5 linhas (cada uma com 8 árvores) destinadas à amostragem destrutiva. Para o cálculo do volume foram mensurados o diâmetro na altura do peito (DAP, 1,3 m acima do nível do solo) e a altura total (H) a cada 6 meses (BINKLEY et al., 2017). Todas as parcelas foram fertilizadas intensivamente durante o primeiro ano para evitar qualquer limitação nutricional, com aplicações de 70 kg N ha⁻¹, 45 kg P ha⁻¹, 85 kg K ha⁻¹, 500 kg Ca ha⁻¹, 90 kg Mg ha⁻¹, 40 kg S ha⁻¹, 3 kg B ha⁻¹, 1 kg Cu ha⁻¹ e 1 kg Zn ha⁻¹) (BINKLEY et al., 2017).

Figura 2.1. Classificação climática de Köppen das localidades utilizadas para a calibração e avaliação para a adaptação do Modelo da Zona Agroecológica para a estimação da produtividade de eucalipto no Brasil. Adaptado de Alvares et al. (2013).

2.2.2. Dados meteorológicos

Foram utilizados os dados meteorológicos diários de temperatura do ar (mínima, média compensada e máxima), irradiação solar global, umidade relativa do ar, chuva e

velocidade do vento fornecidas pelas empresas do projeto TECHS no período de 2012 a 2017. A fim de preencher os dados faltantes, foram usados dados diários das estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) mais próximas aos sítios avaliados.

Na falta ainda dos dados, os mesmos foram preenchidos com os dados em GRID descritos por Xavier, King e Scanlon (2015), disponíveis para o período de 1980-2017 com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Esta base de dados foi escolhida devido ao seu maior desempenho em representar as variáveis meteorológicas observadas (BENDER, 2017).

2.2.3. Adaptação e calibração do modelo da Zona Agroecológica da FAO para a estimativa da produtividade do eucalipto

As calibrações e avaliações do modelo foram realizadas para os 8 clones pertencentes ao projeto TECHS, considerando os 23 sítios descritos na Tabela 2.1, com um total de 1301 dados de volume observados no período de 2012 a 2017, sendo 899 dados destinados à calibração e 402 à avaliação do modelo. Os sítios foram divididos aleatoriamente com uma proporção média de aproximadamente 70%, para a calibração e 30%, para a avaliação, de acordo com a disponibilidade de dados de cada tipo de clone, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Clones de eucalipto e sítios utilizados na calibração e avaliação do Modelo da Zona Agroecológica para a estimação da produtividade de eucalipto no Brasil.

Clones	Calibração* (C)	Avaliação* (A)	Sítios Calibração	Sítios Avaliação
A1	136	60	2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 20, 21, 22 e 23	1, 6, 7, 8, 17, 18 e 19
C3	152	84		
K2	154	70		
Q8	159	82		
Total	601	296	16	7
B2	114	42	5, 6, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 22 e 23	7, 9, 13, 16 e 21
R9	120	48		
Total	234	90	13	5
N5	40	8	3, 4 e 8	9
O6	24	8		
Total	64	16	3	1

* Número de amostras de dados de volume usados na calibração (C) e avaliação (A) do modelo MZA-FAO para a estimação da produtividade de eucalipto, no Brasil.

Para a análise de desempenho do modelo, foram utilizados os seguintes índices estatísticos: raiz do erro quadrático médio (REQM), coeficiente de determinação (R^2), índice de eficiência do modelo (EM) (NASH e SUTCLIFFE, 1970), índice de concordância (d) (WILLMOTT, 1981) e índice de confiança (c) (CAMARGO e SENTELHAS, 1997), conforme as equações apresentadas a seguir:

$$REQM = \left[\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 / n \right]^{0,5} \quad (1)$$

$$R^2 = \left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E}) \right]^2 / \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \right] \right\} \quad (2)$$

$$EM = 1 - \left[\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 / \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right] \quad (3)$$

$$d = 1 - \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 \right] / \left[\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

$$c = r \cdot d \quad (5)$$

em que, O_i são os valores de volume observados no sítios, $\bar{O}$ é a média dos volumes observados, E_i , os valores de volume estimados pelo modelo, $\bar{E}$ a média dos dados estimados e n o número de observações. A interpretação do índice c se encontra na Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Critérios de interpretação do desempenho dos dados pelo índice c (adaptado de Camargo e Sentelhas (1997)).

Valor de c	Desempenho do Modelo
$> 0,85$	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Moderado
0,51 a 0,60	Fraco
0,41 a 0,50	Muito Fraco
$\leq 0,40$	Péssimo

2.2.4. Estimação da produtividade potencial (PP) e atingível (PA)

2.2.4.1. Produtividade potencial (PP)

A produtividade potencial (PP) foi estimada diariamente (i) por meio do Modelo da Zona Agroecológica – FAO (MZA), apresentado por Doorenbos e Kassam (1994), dada pela Equação 6:

$$PP_i = Fb_i \times C_{IAF_i} \times C_{R_i} \times C_{C_i} \quad [kg \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}] \quad (6)$$

em que Fb é a produtividade fotossintética bruta de matéria seca oriunda de uma cultura hipotética ($kg \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}$), C_{IAF} é a correção para o efeito do índice de área foliar da cultura, C_R é a correção para a taxa de manutenção da cultura (respiração), C_C é a correção para o índice de colheita e i é o i -ésimo dia do ciclo.

A produtividade potencial acumulada (PPac) foi obtida por meio do somatório dos valores diários de PP, conforme a equação (7):

$$PPac = \sum_{i=1}^{ND} \left[\frac{(PP/1000)}{\rho_m} \right]_i \quad [m^3 \cdot ha^{-1}] \quad (7)$$

em que ND é o número de dias do ciclo do eucalipto, essa entre 6 a 7 anos e ρ_m a densidade da madeira ($t \cdot m^{-3}$).

2.2.4.2. Produtividade fotossintética bruta de matéria seca (Fb)

Como a Fb é determinada pela disponibilidade de radiação solar, ela leva em consideração a presença ou ausência de nebulosidade, contabilizando a diferença de aproveitamento da energia radiante pelas folhas nos dois casos. A equação (8) representa essa abordagem:

$$Fb = Fb_n + Fb_c \quad [kg \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}] \quad (8)$$

em que Fb_n e Fb_c correspondem à fotossíntese em períodos de céu nublado e em períodos de céu claro, respectivamente, as quais são calculadas de acordo com as Equação 9 e 10:

$$Fb_n = (31,7 + 5,239 \cdot Qo) \cdot cTn \cdot \left(1 - \frac{n}{N}\right) \quad [kg \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}] \quad (9)$$

$$Fb_c = (107,2 + 8,612 \cdot Qo) \cdot cTc \cdot \left(\frac{n}{N}\right) \quad [kg \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}] \quad (10)$$

em que Qo é a irradiância solar incidente no topo da atmosfera ($MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$, Eq. 11), n é insolação ($h \cdot dia^{-1}$), N o fotoperíodo ($h \cdot dia^{-1}$), cTn e cTc são coeficientes de correção relativos à eficiência de fixação do CO_2 , os quais variam com a temperatura do ar, relativos aos períodos de céu nublado e claro, respectivamente. A equação a seguir expressa o cálculo de Qo :

$$Qo = 37,6 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot \left[\left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot (H \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta) + (\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin H) \right] \quad [MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}] \quad (11)$$

em que ϕ é a latitude (graus), δ a declinação solar (graus), H o ângulo horário do nascer do sol (graus) e $(d/D)^2$ a correção para distância relativa Terra-Sol.

Para a cultura do eucalipto, considerada como uma planta C3 de verão, os coeficientes cTn e cTc são determinados pelas seguintes expressões:

Para $16,5 \leq T \leq 37^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned} cTn &= 0,583 + 0,014 \cdot T + 0,0013 \cdot T^2 - 0,000037 \cdot T^3 \\ cTc &= -0,0425 + 0,035 \cdot T + 0,00325 \cdot T^2 - 0,0000925 \cdot T^3 \end{aligned} \quad (12)$$

Para $T < 16,5^\circ\text{C}$ ou $T > 37^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned} cTn &= -0,0425 + 0,035 \cdot T + 0,00325 \cdot T^2 - 0,0000925 \cdot T^3 \\ cTc &= -1,085 + 0,07 \cdot T + 0,0065 \cdot T^2 - 0,000185 \cdot T^3 \end{aligned} \quad (13)$$

em que T é a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$).

2.2.4.3. Correção para o índice de área foliar (C_{IAF})

A correção para o índice de área foliar (Equação 14), adaptada a partir da equação original apresentada por Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002), foi obtida por meio do índice de área foliar diário (IAF_i) de cada clone:

$$C_{IAF} = 0,0186 + 0,37 \cdot IAF_i - 0,035 \cdot IAF_i^2; \quad (IAF_i \geq 5, C_{IAF} = 1) \quad (14)$$

2.2.4.4. Correção para taxa de respiração (C_R)

A correção para a taxa de respiração considera a energia gasta no processo de respiração e foi estimada em função da temperatura média diária (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002):

$$\begin{aligned} C_R &= 0,6 \quad \text{para} \quad T < 20^\circ\text{C} \\ C_R &= 0,5 \quad \text{para} \quad T \geq 20^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (15)$$

2.2.4.5. Correção para o índice de colheita (C_C)

A correção para o índice de colheita foi calibrada considerando-se a partição de biomassa durante todo o ciclo do eucalipto, de acordo com os dados obtidos por Ryan et al. (2010) e Silva et al. (2004) e também nos sítios experimentais disponibilizados pelo projeto TECHS.

2.2.5. Produtividade atingível (PA)

A produtividade atingível é aquela obtida a partir da penalização da produtividade potencial pela deficiência hídrica, sendo esta ponderada por um fator de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (ky) em cada fase de seu crescimento, como descrito a seguir.

$$PA_i = [1 - ky_i \cdot (1 - ETr_i / ETc_i)] \cdot PP_i \quad [kg \cdot ha^{-1}] \quad (16)$$

em que ETr é a evapotranspiração real e ETc a evapotranspiração da cultura, sendo este resultado do produto entre a evapotranspiração de referência (ETo) e o coeficiente de cultura (kc).

A estimativa da ETo foi feita com base no método de Penman-Monteith, conforme recomendado por Allen et al. (1998) e os valores de kc do eucalipto para cada dia do ciclo foram definidos posteriormente no processo de calibração do modelo. A ETr foi estimada pelo balanço hídrico climatológico sequencial de Thornthwaite e Mather (1955) para a cultura do eucalipto. A capacidade de água disponível (CAD) de cada área experimental foi determinada com base nos levantamentos de solo realizados pelas empresas florestais em cada local.

A produtividade atingível acumulada ($PAac$) foi obtida por meio do somatório dos valores diários de PA .

$$PAac = \sum_{i=1}^{ND} \left[\frac{(PA/1000)}{\rho_m} \right]_i \quad [m^3 \cdot ha^{-1}] \quad (17)$$

2.2.6. Calibração dos coeficientes kc e ky e inclusão de funções de penalização por déficit hídrico e ocorrência de geada

O coeficiente de cultura (kc) varia de acordo com as fases de desenvolvimento da cultura e representa a relação entre a ETc e a ETo . Como a ETc varia em função do tipo de cultura e fase de desenvolvimento, além do efeito das condições meteorológicas, e a ETo é função exclusiva das condições meteorológicas, o kc indicará para uma dada fase da cultura quanto a ETc representa da ETo (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

Assim, foi ajustada uma curva característica dos valores do coeficiente de cultura (kc) com base nos dados de Alves (2009), obtidos na região Centro-Leste de Minas Gerais, para três clones de *Eucalyptus grandis* e um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (“urograndis”);

O coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (k_y) varia de acordo com a fase fenológica e entre as espécies e/ou clones. Os valores de k_y foram calibrados mensalmente por meio da relação entre E_{Tr}/E_{Tc} e PA/PP (Equação 18) e de acordo com a sensibilidade do eucalipto ao déficit hídrico ao longo de seu ciclo de modo a aproximar os valores de volume estimados daqueles observados:

$$k_y = \frac{(1 - PA/PP)}{(1 - E_{Tr}/E_{Tc})} \quad (18)$$

Além dos coeficientes já advindos do modelo MZA-FAO, também foram incorporadas ao modelo funções de penalização da produtividade por ocorrência de geada (f_{frost}) e por mortalidade devido a períodos de elevada deficiência hídrica acumulada (f_{wd}). A inclusão dessas funções no processo de adaptação do modelo se deu pela importância de serem elementos meteorológicos que impactam diretamente a produtividade do eucalipto e que são comumente observados nas regiões produtoras.

O ajuste do modelo foi realizado em cinco etapas. Na primeira etapa foram utilizados apenas valores fixos, para todos os clones, para o índice de colheita ($C_c = 0,83$), como encontrado por Ryan et al. (2010), para a densidade média da madeira, sendo o valor empregado igual à média de todos os clones ($\rho_m = 0,44 \text{ t m}^{-3}$), para o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (k_y), igual a 1 em todas as fases do ciclo do eucalipto, e sem a inclusão das funções de penalização por ocorrência de geada (f_{frost}) e mortalidade causada por longos períodos de deficiência hídrica (f_{wd}).

Na segunda etapa, somente o C_c foi ajustado de acordo com cada clone, enquanto que na terceira etapa foi adicionada também a variação temporal da densidade da madeira para todos os clones. Na quarta etapa foi incrementada a variação mensal do k_y para cada clone. A quinta etapa por sua vez, além das variações de todos os coeficientes para cada clone, foram também incluídas as duas funções de penalização da produtividade f_{frost} e f_{wd} .

2.3. Resultados e Discussão

2.3.1. Adaptação e calibração do modelo

O índice de área foliar diário da floresta de eucalipto (IAF) foi ajustado de acordo com valores da literatura, assim como com dados observados nos sítios experimentais do projeto TECHS (Figura 2.2A). O IAF máximo foi considerado igual a 6, como encontrado por Lourenço (2009) para condições de eucalipto fertirrigado na região do Vale do Rio Doce, MG. A variação temporal da densidade da madeira (ρ_m , Figura 2.2B) foi ajustada usando um

modelo não linear proposto por Sands e Landsberg (2002) e dados observados do período de máximo crescimento de cada clone para todas as localidades do projeto TECHS (Tabela 2.4), que foram incorporados a curva características de densidade por meio da variável b_1 (Figura 2.2B). Os valores de índice de colheita (C_c) também foram calibrados para cada clone (Tabela 2.4) de acordo com a partição de biomassa destinada ao fuste do eucalipto.

Figura 2.2. Variação temporal do índice de área foliar (IAF, A), da densidade da madeira (ρ_m , B), da profundidade efetiva do sistema radicular (Z_r , C) e coeficiente de cultura (k_c , D) para florestas de eucalipto durante seu ciclo de crescimento, empregados no modelo adaptado MZA–FAO.

Para a definição da profundidade efetiva do sistema radicular da floresta de eucalipto (Z_r), foi ajustada uma curva característica (Figura 2.2C) com base em Christina et al. (2016),

considerando-se 3 m como a profundidade efetiva máxima do sistema radicular, a ser atingida por volta dos 30 meses após o plantio, a partir de quando se considerou tal profundidade estável até o final do ciclo do eucalipto. Os valores de K_c seguiram o mesmo padrão da curva característica do IAF (Figura 2.2A), variando de 0,5 no início do ciclo, atingindo o valor máximo (1,2) por volta dos 30 meses e decrescendo gradativamente a partir daí até o final do ciclo, atingindo 0,65 aos 84 meses (Figura 2.4D).

Tabela 2.4. Valores calibrados de densidade da madeira média (ρ_m) e índice de colheita (C_c) empregados no modelo MZA-FAO adaptado para a estimação da produtividade dos clones de eucalipto plásticos (P), tropicais (T) e subtropicais (S), no Brasil.

Clone	Densidade média (ρ_m , t m ⁻³)	Índice de Colheita (C_c)
A1	0,43	0,72
C3	0,43	0,66
K2	0,44	0,70
Q8	0,44	0,68
B2	0,44	0,75
R9	0,48	0,68
N5	0,46	0,65
O6	0,40	0,66
Média	0,44	0,69

Depois do modelo calibrado, foi ajustada uma curva característica da variação do coeficiente ky , conforme a Equação 19. Dessa forma, a sensibilidade ao estresse hídrico do eucalipto variou não só em função do clone, mas também das fases do ciclo de crescimento da floresta de eucalipto (Tabela 2.5).

$$ky_i(m) = \frac{(ky_{f+1} - ky_f)}{(M_{f+1} - M_f)} + ky_{i-1} \quad M_f \leq m \leq M_{f+1} \quad (19)$$

em que ky_i é o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico diário, m o mês do ciclo, variando de 1 a M , ky_{f+1} e ky_f são os valores de ky calibrados para a fase subsequente e fase atual, respectivamente e M_{f+1} e M_f os meses de cada fase corresponde aos valores de ky calibrados (Tabela 2.5).

A geada é um dos principais eventos meteorológicos que limitam o desenvolvimento do eucalipto, sendo que as árvores afetadas por geada podem apresentar desde a queima ou bronzeamento da folhagem (DIBAX, 2007) até a morte da planta, restringindo o potencial de crescimento do eucalipto (HIGA; GARCIA; SANTOS, 1995). A magnitude do dano provocado pela geada depende também da intensidade e da temperatura mínima (SAKAI;

LARCHER, 1987) além da época em que o fenômeno ocorre e sua extensão espacial (HIGA; MORA; HIGA, 2000).

Tabela 2.5. Coeficientes de sensibilidade ao déficit hídrico (ky) calibrados para os clones de eucalipto plásticos, tropicais e subtropicais utilizados para a adaptação do Modelo da Zona Agroecológica para a estimação da produtividade de eucalipto no Brasil.

Fases (f)	Meses (M)	Clones								Média
		Plástico				Tropical		Subtropical		
		A1	C3	K2	Q8	B2	R9	N5	O6	
1	1	1,3	1,5	1,4	1,5	1,2	1,4	1,6	1,6	1,4
2	10	1,1	1,3	1,3	1,4	1,1	1,3	1,5	1,5	1,3
3	30	1,4	1,8	1,7	1,7	1,4	1,5	1,9	1,8	1,7
4	60	1,1	1,5	1,2	1,2	1,1	1,0	1,6	1,4	1,3
5	84	0,8	1,0	0,8	1,0	0,8	0,9	1,2	1,2	1,0

Dada a importância da quantificação dos efeitos de episódios de geada na produtividade do eucalipto, foi criada a função f_{frost} (Tabela 2.6) que penaliza a produtividade potencial diária (PP_i) de forma multiplicativa (Equação 20) em dias de ocorrência de temperatura mínima do ar menor do que 2°C. A função também penaliza as produtividades potencial (PP_{ac}) e atingível (PA_{ac}) acumuladas do eucalipto (Equações 21 e 22, respectivamente) e quanto menor for o valor de Tmin registrado, maior será a magnitude da penalização pela função f_{frost} .

No caso da penalização da PP diária, esta é dada pelo dano que afetará a cultura até o final de seu ciclo, enquanto que a penalização na PPac e PAac se refere ao dano (mortalidade) ocasionado pelo evento isolado naquele dia. Esta função foi considerada em todos os sítios que registraram ocorrência de geada durante o ciclo da cultura e ela penaliza a cultura até os dois anos de idade, pois é o período em que as plantas são menos tolerantes ao frio. Além disso, em povoamentos mais jovens, as plantas estão sujeitas à temperaturas menores (folhas mais próximas a relva) (HIGA; MORA; HIGA, 2000).

$$PP_{adj_i} = PP_i \cdot \prod_{i=1}^{ND} (f_{\text{frost}})_i \begin{pmatrix} \text{se } i \leq 2\text{anos}; f_{\text{frost}} = f_{\text{frost}} \\ \text{se } i > 2\text{anos}; f_{\text{frost}} = 1 \end{pmatrix} \quad [\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}] \quad (20)$$

$$PP_{ac} = \sum_{i=1}^{ND} \left[\left(\frac{PP}{1000} \right) \cdot f_{\text{frost}} \right]_i \begin{pmatrix} \text{se } i \leq 2\text{anos}; f_{\text{frost}} = f_{\text{frost}} \\ \text{se } i > 2\text{anos}; f_{\text{frost}} = 1 \end{pmatrix} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}] \quad (21)$$

$$PA_{ac} = \sum_{i=1}^{ND} \left[\left(\frac{PA}{1000} \right) \cdot f_{\text{frost}} \right]_i \begin{pmatrix} \text{se } i \leq 2\text{anos}; f_{\text{frost}} = f_{\text{frost}} \\ \text{se } i > 2\text{anos}; f_{\text{frost}} = 1 \end{pmatrix} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}] \quad (22)$$

em que G é ND é o número de dias para atingir a idade de colheita ou corte, ρ_m a densidade da madeira (t m^{-3}), f_{frost} a função de penalização por geada e i é o i -ésimo dia do ciclo.

Tabela 2.6. Função de penalização por ocorrência de geada (f_{frost}) para a estimação da produtividade de florestas de eucalipto no Brasil, considerando idade das plantas até os dois anos de idade.

Temperatura Mínima do Ar Diária (Tmin, °C)	Clones								Média
	Plástico				Tropical		Subtropical		
	A1	C3	K2	Q8	B2	R9	N5	O6	
1 ≤ Tmin ≤ 2	0,99	1,00*	1,00	0,99	1,00	0,94	1,00	1,00	0,99
0 ≤ Tmin ≤ 1	0,99	1,00	0,99	0,98	0,99	0,94	1,00	1,00	0,99
-1 ≤ Tmin ≤ 0	0,98	0,99	0,99	0,98	0,99	0,94	0,99	1,00	0,98
-2 ≤ Tmin ≤ -1	0,98	0,99	0,98	0,98	0,97	0,93	0,99	0,98	0,98
-3 ≤ Tmin ≤ -2	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,93	0,97	0,96	0,96
-4 ≤ Tmin ≤ -3	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,93	0,95	0,95	0,95
Tmin < -4	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,90	0,93	0,93	0,93

*Valores próximos a 1 indicam maior tolerância do clone quanto a ocorrência de geada durante seu ciclo de crescimento.

Outro evento meteorológico que afeta negativamente a produtividade do eucalipto no Brasil são as secas prolongadas que causam intensos níveis de deficiência hídrica (MARTINS et al., 2008; ABREU et al., 2015). Tais condições, quando extremas, podem levar à mortalidade nas plantações de eucalipto, resultando em elevados impactos econômicos para as empresas florestais (HODECKER, 2015). No entanto, sabe-se que as diversas espécies de eucalipto apresentam diferentes níveis de tolerância à mortalidade por estresse hídrico (TATAGIBA et al., 2007), o que faz necessária a introdução de uma função de penalização por mortalidade nos modelos de simulação da produtividade do eucalipto.

Em função disso, foi inserida no modelo uma função que penaliza a produtividade atingível (PA) em decorrência da mortalidade das árvores como resultado de deficiências hídricas muito elevadas. Essa função, denominada de f_{wd} (Equação 23), considera a restrição hídrica durante o ciclo da cultura do eucalipto, de forma multiplicativa. Esta função, admite uma mortalidade teórica das plantas causada por grandes acumulados mensais de deficiência hídrica (Tabela 2.7), calculados pelo balanço hídrico sequencial da floresta de eucalipto. A penalização da PA pela f_{wd} é apresentada a seguir:

$$PA_{adj_i}(m) = PA_i(m) \cdot \prod_{m=1}^M (f_{wd})_m \quad [kg \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}] \quad 1 \leq m \leq M \quad (23)$$

em que M é o número de meses que o eucalipto demora para atingir a idade de colheita ou corte ($M = 72$ a 84 meses), f_{wd} a função de mortalidade por deficiência hídrica e i é o i -ésimo dia do ciclo.

Tabela 2.7. Função de penalização por deficiência hídrica intensa (f_{wd}) para a estimação da produtividade de florestas de eucalipto no Brasil.

Déficit Hídrico Acumulado Mensal (DEFac _{men} , mm)	Clones								Média
	Plástico				Tropical		Subtropical		
	A1	C3	K2	Q8	B2	R9	N5	O6	
0 ≤ DEFac _{men} ≤ 100	1,00*	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
101 ≤ DEFac _{men} ≤ 150	0,98	0,90	0,90	0,95	0,95	0,98	0,90	0,90	0,93
151 ≤ DEFac _{men} ≤ 200	0,95	0,80	0,85	0,85	0,85	0,95	0,80	0,85	0,86
201 ≤ DEFac _{men} ≤ 250	0,90	0,75	0,80	0,80	0,85	0,90	0,80	0,80	0,83
251 ≤ DEFac _{men} ≤ 300	0,85	0,70	0,75	0,75	0,80	0,80	0,70	0,75	0,76
DEFac _{men} > 300	0,75	0,65	0,70	0,70	0,75	0,70	0,65	0,70	0,70

*Valores próximos a 1 indicam maior tolerância do clone à deficiência hídrica intensa durante seu ciclo de crescimento.

Com as adaptações descritas acima acrescentadas ao modelo original, tem-se o Modelo da Zona Agroecológica Adaptado para a estimação da produtividade de florestas de eucalipto no Brasil. A Figura 3 ilustra a estrutura resumida dessa adaptação do modelo e os parâmetros que são usados para as estimativas da produtividade potencial (PP) e atingível (PA).

2.3.2. Estimação das produtividades potencial (PP) e atingível (PA)

As etapas de ajuste dos modelos são mostradas na Figura 2.4. Todas essas modificações promoveram um melhor desempenho do modelo, assim como feito por outros autores na adaptação do modelo da MZA-FAO para as culturas da soja (Battisti, 2013), da cana-de-açúcar (Monteiro e Sentelhas, 2014; Dias e Sentelhas, 2017) e da palma forrageira por Carvalho et al. (2017).

O modelo MZA-FAO superestimou os valores de volume total de eucalipto, principalmente na primeira etapa de ajuste do modelo (Figura 2.4A). Houve uma melhoria gradual do desempenho do modelo com a inclusão dos diferentes coeficientes, com os valores de REQM sendo de $109,82 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ na primeira etapa e atingindo $38,61 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ na última etapa, ou seja, uma redução de aproximadamente 65% (Figura 2.4), com exceção da segunda

etapa (Figura 2.4B) para a terceira etapa (Figura 2.4C). Quanto à precisão das estimativas de volume total, também houve uma melhoria expressiva com o avanço das etapas de calibração, com o R^2 indo de 0,73 na primeira etapa a 0,82 na última (Figura 2.4). As estimativas obtidas pelo modelo MZA-FAO também se mostraram acuradas, com o índice d chegando a 0,93 (Figura 2.4E) na etapa final de calibração. Houve também uma melhora significativa na eficiência do modelo (EM), indo de -1,01 na primeira etapa (Figura 2.4A) a 0,75 na última etapa (Figura 2.4E). Valores de EM menores ou iguais a zero indicam que as estimativas do modelo são consideradas inaceitáveis ou ruins, enquanto que valores próximos a 1, indicam que as estimativas do modelo podem ser consideradas perfeitas (SANTHI et al., 2001). Em termos gerais, o índice de confiança (c) mostrou que as estimativas do volume total do eucalipto passaram de um desempenho fraco ($c = 0,59$) na etapa inicial (Figura 2.4A) a muito bom ($c = 0,84$) na última etapa (Figuras 2.4A a 2.4E). O desempenho geral na fase de avaliação foi ainda melhor, classificado como ótimo ($c = 0,87$), de acordo com Camargo e Sentelhas (1997) (Figura 2.4F).

Figura 2.3. Diagrama geral dos parâmetros originais e incluídos na adaptação do Modelo da Zona Agroecológica (MZA-FAO) para a estimação da produtividade de florestas de eucalipto no Brasil. ϕ – latitude (graus); Q_o – irradiância solar no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); n – insolação (h dia^{-1}); N – fotoperíodo (h dia^{-1}); cT_n e cT_c – correção da devido à temperatura em dias de céu nublado e claro, respectivamente; IAF – índice de área foliar; $T_{\min}$ – temperatura mínima diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); k_c – coeficiente de cultura (adimensional); Z_r – comprimento efetivo radicular (m); P – chuva diária (mm); T – temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); E_{to} – evapotranspiração de referência diária (mm); CAD – capacidade de água disponível (mm); $DEFac_{\text{mensal}}$ – deficiência hídrica mensal acumulada (mm).

A maioria dos modelos de simulação de eucalipto utilizados são baseados em processos e requerem dados mais detalhado e em maior quantidade, fazendo com que o modelo MZA-FAO adaptado se destaque pela sua simplicidade e bom desempenho na estimativa da produtividade, em volume, de eucaliptos em toda a região produtora brasileira. Em comparação com outros trabalhos, o modelo MZA-FAO adaptado obteve desempenhos satisfatórios e superiores aos trabalhos de Miehle et al. (2009), estudando 62 localidades produtoras de eucalipto na região sul da Austrália. Estes autores utilizaram quatro diferentes modelos baseados em processos, sendo eles modelo 3-PG, 3-PG+, CABALA e Forest-DNDC em plantações de *Eucalyptus globulus* durante o ciclo de crescimento de 2 a 8 anos. Os máximos valores de EM encontrados pelos modelos variaram com o ciclo do eucalipto e foram maiores no sexto ano para os modelos 3-PG e 3-PG+ (EM de 0,28 e 0,57, respectivamente), enquanto que os modelos CABALA e Forest-DNDC apresentaram maiores valores de eficiência da modelagem no oitavo ano do ciclo, com valores de 0,70 e 0,30, para esses modelos respectivamente. Acrescentando o modelo MoBiLE-PDT (*Modular Biosphere Simulation Environment*), Miehle et al. (2010) também encontraram valores de EM inferiores aos do Modelo MZA-FAO adaptado, estes variando entre 0,69 a 0,58, aos 6 e 8 anos de idade para a espécie *Eucalyptus globulus* no sul da Austrália.

A precisão do modelo (R^2) MZA-FAO adaptado foi também superior tanto na calibração quanto na avaliação em relação aos valores encontrados por Xie, Wang e Lei (2017) na região nordeste da China, com valores variando entre 0,81 na calibração e 0,76 na avaliação, também utilizando o modelo 3-PG. Porém, para González-García et al. (2016) a precisão e exatidão do modelo 3-PG foram ligeiramente maiores em relação ao modelo MZA-FAO adaptado, com valores de R^2 (0,84), EM (0,79) e REQM ($29,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) durante a fase de calibração e R^2 igual a 0,91, EM igual a 0,90 e REQM igual a $17,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ na fase de avaliação para o *Eucalyptus nitens* na região noroeste da Espanha.

Para as regiões produtoras de eucalipto brasileiras, a maioria dos estudos que envolvem a modelagem da produtividade utiliza o modelo 3-PG. Almeida et al. (2010) encontraram para dois híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* nos estados do Espírito Santo e Bahia, precisão do modelo 3-PG variando entre 0,80 a 0,91 e eficiência do modelo entre 0,70 a 0,80, também com número de amostragens inferiores aos usados na calibração do modelo MZA-FAO. Para o estado de Minas Gerais, (BORGES et al., 2012) estudando a modelagem para híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, encontraram precisão do modelo 3-PG de 0,92. Já para a região sul de São Paulo, (ALVARES, 2011) usando o modelo 3-PGIS (*Physiological Processes Predicting Growth in*

Geographical Information System), o qual é derivado do modelo original 3-PG e espacialmente distribuído, encontrou precisão do modelo de 0,9 e classificação segundo o índice de confiança *c* de ótimo na estimativa dos dados observados de volume da madeira. Também com o uso do modelo 3-PG modificado na estimativa do volume da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* para duas regiões do Pará e Amapá, (RASCON, 2012) obteve durante o processo de calibração e avaliação melhorias em relação ao modelo original, com coeficientes de determinação variando entre 0,86 a 0,97, índice de concordância de Willmott (*d*) variando entre 0,94 a 0,98 e REQM estando entre 11,6 m³ ha⁻¹ a 17,4 m³ ha⁻¹ durante o processo de calibração enquanto que durante o processo de avaliação os índices estatísticos variaram entre 0,83 a 0,91 para R², 0,91 a 0,97 para o índice *d* e 12,6 m³ ha⁻¹ a 19,8 m³ ha⁻¹ para os valores de REQM.

As Figuras 2.5 e 2.6 apresentam a relação entre os valores observados e estimados de volume total de eucalipto, respectivamente durante os processos de calibração e avaliação do modelo MZA-FAO, para cada um dos oito clones analisados. Para a calibração (Figura 2.5), todos os clones apresentaram valores de coeficiente de determinação (R²) maiores que 0,77, erros menores que 41,0 m³ ha⁻¹, grande concordância entre os dados estimados e observados, com índice *d* maiores que 0,91 e classificados segundo o índice de desempenho de muito bons (*c* variando de 0,80 a 0,83) a ótimos (*c* variando entre 0,87 a 0,93).

Figura 2.4. Relação entre o volume de madeira observado e estimado para diferentes clones de eucalipto (Plásticos, Tropicais e Subtropicais), empregando-se o modelo adaptado da Zona Agroecológica em distintas etapas de calibração: (A) Modelo em sua forma inicial, com valores fixos de índice de colheita (C_c), densidade média da madeira (ρ_m), coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (ky) e sem a inclusão das funções de penalização por ocorrência de geada (f_{frost}) e mortalidade por deficiência hídrica (f_{wd}); (B) Acrescentado ao modelo o valor calibrado de C_c ; (C) Acrescentado ao modelo os valores calibrados de C_c e ρ_m ; (D) Acrescentado ao modelo os valores calibrados de C_c , da ρ_m e do ky ; (E) Acrescentando ao modelo os valores calibrados de C_c , da ρ_m e do ky e as funções de penalização f_{frost} e f_{wd} ; e (F) avaliação do modelo MZA-FAO em sua forma final com dados independentes, em diferentes regiões Brasileiras. Linha tracejada representa a reta 1:1.

Entre os oito clones estudados, os clones A1 e O6 foram os que apresentaram melhores estatísticas comparados aos demais, enquanto que os clones Q8 e C3 apresentaram

estatísticas inferiores durante a fase de calibração do modelo. Em geral, o modelo superestimou os dados de volume de madeira no começo do ciclo do eucalipto e passou a subestimar o volume nas fases finais do ciclo, com exceção dos clones Q8 e O6 que superestimaram o volume em praticamente todo o ciclo (Figura 2.5). A superioridade do clone O6 pode ser também ocasionada pelo menor número de dados medidos que foram utilizados para o ajuste e a avaliação do modelo. Isto mostra a importância de se usar índices estatísticos de forma conjunta, pois de maneira isolada um modelo pode ser considerado insatisfatório, com base em determinado índice e satisfatório para outro e vice-versa (RIVINGTON et al., 2005; ABRAHA; SAVAGE, 2008).

Na fase de avaliação do modelo (Figura 2.6), a precisão e exatidão para os diferentes clones foram semelhantes as encontradas na fase de calibração do modelo. Os valores de R^2 variam entre 0,80 para o clone K2 a 0,99 para os clones subtropicais (N5 e O6), os erros foram menores que $50,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, grande concordância dos dados estimados com os observados (d maiores que 0,9), desempenho do modelo variando entre muito bom para os clones plásticos (c variando entre 0,80 para o clone K2 a 0,85 para o clone A1) a ótimo para os clones tropicais (c de 0,95 para o clone B2 e 0,96 para o clone R9) e subtropicais (c de 0,95 para o clone N5 e 0,97 para o clone O6).

Em geral, os clones tropicais e subtropicais foram superiores, principalmente na avaliação, que os clones plásticos na estimação do volume de eucaliptos nas diversas localidades brasileiras, sendo estas com padrões edafoclimáticos completamente diferentes.

Figura 2.5. Relação entre o volume de madeira observado e estimado para os oito clones de eucalipto, empregando-se o modelo adaptado da Zona Agroecológica em sua forma final, na fase de calibração, em diferentes regiões brasileiras. Clones plásticos: A1 (*E. urophylla* x *sp.*), C3 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), K2 (*E. saligna*) e Q8 (*E. grandis* x *sp.*); Clones tropicais: B2 (*E. urophylla* x *E. grandis*) e R9 (*E. urophylla*); e Subtropicais: N5 (*E. dunnii*) e O6 (*E. grandis*). Linha tracejada representa a reta 1:1.

Figura 2.6. Relação entre o volume de madeira observado e estimado para os oito clones de eucalipto, empregando-se o modelo adaptado da Zona Agroecológica em sua forma final, na fase de avaliação com dados independentes, em diferentes regiões brasileiras. Clones plásticos: A1 (*E. urophylla* x sp), C3 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), K2 (*E. saligna*) e Q8 (*E. grandis* x sp); Clones tropicais: B2 (*E. urophylla* x *E. grandis*) e R9 (*E. urophylla*); e Subtropicais: N5 (*E. dunnii*) e O6 (*E. grandis*). Linha tracejada representa a reta 1:1.

A deficiência hídrica e ocorrência de temperaturas muito altas ou muito baixas são fatores limitantes para a obtenção de maiores produtividades de eucaliptos principalmente quando ocorrida em fases mais sensíveis durante o ciclo da cultura (BINKLEY et al., 2017; GONÇALVES et al., 2017). Na Figura 2.7 são apresentados dados, como estudo de caso, de quatro localidades brasileiras produtoras de eucalipto com diferentes condições edafoclimáticas para o clone A1, a fim de representar a variação temporal das produtividades potencial (PP) e atingível (PA), e como esta última varia de acordo com a deficiência hídrica. Observa-se nas Figuras 2.7A-C que quando há períodos de deficiência hídrica, o modelo reduz a PA em função do efeito destes períodos na PP. Ao longo do ciclo de sete anos é possível observar a perda de produtividade acumulada decorrente da deficiência hídrica, evidente nas localidades de Estrela do Sul, MG (Figura 2.7A), Chapadão do Sul, MS (Figura 2.7B) e Peixe, TO (Figura 2.7C). Por outro lado, em Otacílio Costa, SC (Figura 2.7D), onde praticamente não há deficiência hídrica, as variações da produtividade são causadas pelas baixas temperaturas do ar e, ocasionalmente, pelas geadas. Observa-se que a diferença entre PP e PA é baixa e decorrente muito mais das limitações térmicas do que hídricas.

As variações temporais das produtividades potencial (PP), atingível (PA) e observada (PO) são apresentadas na Figura 2.8. De um modo geral, o modelo simulou adequadamente a evolução do volume de madeira ao longo do ciclo do eucalipto, apresentando erros menores que $36,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, altos valores de coeficiente de determinação (R^2 maiores que 0,96), com exceção do clone K2 para a localidade de Bocaiúva (Figura 2.8C), índice d variando de 0,65 para o clone K2 (Bocaiúva-MG, Figura 2.8C) a 0,99 para os clones tropicais (B2 e R9) e localidades de Inocência, MS e Rio Verde, GO, respectivamente. Em relação ao seu desempenho na simulação temporal do crescimento dos clones de eucalipto, o modelo pôde ser classificado como muito bom ($c = 0,83$ para o clone Q8 em Três Barras, SC) e ótimo (c variando de 0,92 para o clone B2 em Antônio Olinto, PR a 0,98 para o clone R9 e localidades de Inocência, MS e Rio Verde, GO, respectivamente) para a maioria das localidades e muito fraco para a localidade de Bocaiúva para o clone K2 ($c = 0,50$) e apresentou valores de EM variando entre 0,22 para Bocaiúva, MG (clone K2), a 0,95 para Inocência, MS (clone B2).

Stape et al. (2010), em um estudo da produtividade potencial de eucaliptos em oito diferentes localidades produtoras brasileiras, distribuídas nos estados de BA, ES, MG e SP, encontraram valores de PP final menores aos estimados pelo modelo MZA-FAO adaptado, com PPs variando entre $169,1 \text{ t ha}^{-1}$ (cerca de $338,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) em Aracruz, ES, a $220,2 \text{ t ha}^{-1}$ (aproximadamente $440,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) em Eunápolis, BA, considerando densidade média da madeira de $0,50 \text{ t m}^{-3}$ e ciclo de crescimento de seis anos.

Figura 2.7. Variação temporal das produtividades potencial (PP) e atingível (PA) do eucalipto, em volume de madeira, estimados pelo Modelo da Zona Agroecológica adaptado, e extrato do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), com os valores de excedente hídrico (EXC) e de deficiência hídrica (DEF) em quatro localidades brasileiras: A – Estrela do Sul, MG (CAD = 195 mm); B – Chapadão do Sul, MS (CAD = 254 mm); C – Peixe, TO (CAD = 293 mm); D – Otacílio Costa, SC (CAD = 335 mm), para o clone A1.

Já na fase inicial do ciclo, o modelo superestimou os valores de volume para todos os sítios e todos os clones (Figura 2.8). Mesmo padrão foi encontrado por Miehle et al. (2009), estudando quatro modelos de baseados em processos para a simulação da produtividade de eucaliptos na Austrália, com superestimativa do crescimento florestal de plantações de *E. globulus* aos dois anos de idade. Miehle et al. (2009) constataram também que estimativas precisas do crescimento florestal em idades muito jovens não são tão importantes na obtenção de estimativas mais precisas nas fases finais do ciclo além de não serem tão interessantes para a maioria das aplicações comerciais, científicas e também políticas. Além disso, todos os modelos dinâmicos de crescimento tendem a autocorrigir a trajetória do crescimento das

árvores ao longo do ciclo e a trajetória final é também determinada pela forma com que os modelos preveem os efeitos locais no crescimento das árvores (SANDS; LANDSBERG, 2002; MIEHLE et al., 2009).

2.4. Conclusões

O MZA-FAO, após a sua adaptação e inclusão das novas funções de penalização (penalização por ocorrência de geada (f_{frost}) e mortalidade por períodos de elevada deficiência hídrica acumulada (f_{wd})), apresentou bom desempenho na estimação do crescimento e produtividade do eucalipto, principalmente para os clones tropicais (B2 e R9) e subtropicais (N5 e O6).

O desempenho do modelo aumentou gradualmente, principalmente com a inclusão dos diferentes coeficientes de sensibilidade hídrica (ky), índice de colheita (Cc) e as funções de penalização calibradas para cada clone, enquanto que a inclusão da densidade da madeira (ρ_m) para cada clone não ocasionou uma melhora das estatísticas do modelo. Isto evidencia a importância da calibração do modelo tanto pelos parâmetros da cultura quanto da localidade de cada sítio experimental.

A adaptação do modelo da Zona Agroecológica – MZA para a cultura do eucalipto apresentou grande potencial para ser utilizada em diferentes estudos, devido à sua simplicidade, facilidade de ajuste e aplicabilidade em diversas localidades produtoras brasileiras.

Figura 2.8. Variação temporal das produtividades potencial (PP), atingível (PA), estimadas pelo modelo MZA-FAO, e observada (PO) do eucalipto, em volume de madeira, em diferentes localidades brasileiras: A – Guanhães, MG; B – Peixe, TO; C – Bocaiúva, MG; D – Três Barras, SC; E – Inocência, MS; F – Rio Verde, GO; G – Buri, SP; e H – Antônio Olinto, PR, para oito clones (Plásticos – A1, C3, K2 e Q8; Tropicais – B2 e R9; Subtropicais – N5 e O6).

Referências

- ABRAHA, M. G.; SAVAGE, M. J. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 3, p. 401-416, 2008.
- ABREU, M. C.; MARTINS, F. B.; FREITAS, C. H. de; PEREIRA, R. A. de A.; MELLONI, E. G. P. Valores limítrofes para transpiração, desenvolvimento e crescimento de *Corymbia citriodora* (Hook.) K. D. Hill & L.A.S. Johnson em resposta à deficiência hídrica no solo. **Revista Árvore**, v. 39, n. 5, p. 841–852, 2015.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. **Irrigation and Drainage Paper No. 56**, FAO, n. 56, p. 300, 1998.
- ALMEIDA, A. C.; SIGGINS, A.; BATISTA, T. R.; BEADLE, C.; FONSECA, S.; LOOS, R. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1730–1740, 2010.
- ALVARES, C. A. **Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de eucalyptus no sul do estado de São Paulo**. 2011. 279f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- BATTAGLIA, M.; SANDS, P. Modelling Site Productivity of *Eucalyptus globulus* in Response to Climatic and Site Factors. **Functional Plant Biology**, v. 24, n. 6, p. 831–850, 1997.
- BATTAGLIA, M.; SANDS, P.; WHITE, D.; MUMMERY, D. CABALA: a linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for silvicultural decision support. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1, p. 251–282, 2004.
- BATTISTI, R. **Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil**. 2013. 261f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, Piracicaba.

- BENDER, F. D. **Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade da cultura de milho e estratégias de manejo para minimização de perdas em diferentes regiões brasileiras**. 2017. 182f. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, Í.; STAPE, J. L. 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.
- BORGES, J. S.; NEVES, J. C. L.; LOURENÇO, H. M.; BARROS, N. F.; DIAS, S. C. M. Parameterization of the 3-PG model for eucalypt in the region of Cerrado in Minas Gerais State. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, p. 567-578, 2012.
- CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação de desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARVALHO, A. V. T.; SILVA, T. G. F. da; SOUZA, L. S. B. de; MOURA, S. B. de. Modificação do modelo original da zona agroecológica da FAO e aplicação na análise da eficiência produtiva da palma forrageira no estado da Bahia: 1ª aproximação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 3, p. 940-954, 2017.
- CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J. P.; STAPE, J. L.; BOUILLET, J. P.; LAMBAIS, G. R.; LE MAIRE, G. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology**, v. 31, p. 509-519, 2016.
- DE WIT, C. T. Photosynthesis of leaf canopies. **Agricultural Research Reports**, Wagening, n. 663, p.1-56, 1965.
- DIAS, H. B. **Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil**. 2016. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- DIBAX, R. **Transformação genética de eucalyptus saligna com o gene p5csf129a via agrobacterium tumefaciens**. 2007. 131p.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306p.

- GONÇALVES, J. L.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 79, n. 3, p. 169-183, 2017.
- GONZÁLEZ-GARCÍA, M.; ALMEIDA, A. C.; HEVIA, A.; MAJADA, J.; BEADLE, C. Application of a process-based model for predicting the productivity of Eucalyptus nitens bioenergy plantations in Spain. **GCB Bioenergy**, v. 8, n. 1, p. 194-210, 2016.
- HIGA, A. R.; GARCIA, C. H.; SANTOS, E. T. dos. Geadas, prejuízos à atividade florestal. **Embrapa Florestas**, v. 16, n. 59, p. 40-43, 1995.
- HIGA, R. C. V.; MORA, A. L.; HIGA, A. R. Plantio de Eucalipto na Pequena Propriedade Rural. **Embrapa Florestas**, v. 54, p. 31, 2000.
- HODECKER, B. E. R. **Comparison of drought stress responses of tolerant and sensitive eucalypt genotypes**. 2015. 145f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- JOHNSEN, K.; SAMUELSON, L.; TESKEY, R.; MCNULTY, S.; FOX, T. Process Models as Tools in Forestry Research and Management. **Forest Science**, v. 47, n. 1, p. 2-8, 2001.
- JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 235-265, 2003.
- LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, n. 3, p. 209-228, 1997.
- LEMOS, C. C. Z. De. **Aprimoramentos , teste e uso do modelo 3-PG em plantios clonais de eucalyptus no nordeste do estado de São Paulo**. 2012. 175f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- LI, C.; ABER, J. D.; STANGE, F.; BUTTERBACH-BAHL, K.; PAPEN, H. A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils. Model development. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. 1999, p. 4369-4384, 2000.
- LOURENÇO, H. M. **Crescimento e eficiência do uso de água e nutrientes em eucalipto fertirrigado**. 2009. 145f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

- MARTINS, F. B.; STRECK, N. A.; DA SILVA, J. C.; MORAIS, W. W.; SUSIN, F.; NAVROSKI, M. C.; VIVIAN, M. A. Deficiência hídrica no solo e seu efeito sobre transpiração, crescimento e desenvolvimento de mudas de duas espécies de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1297-1306, 2008.
- MCCOWN, R. L.; HAMMER, G. L.; HARGREAVES, J. N. G.; HOLZWORTH, D. P.; FREEBAIRN, D. M. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. **Agricultural Systems**, v. 50, n. 3, p. 255-271, 1996.
- MIEHLE, P.; BATTAGLIA, M.; SANDS, P. J.; FORRESTER, D. I.; FEIKEMA, P. M.; LIVESLEY, S. J.; MORRIS, J. D.; ARNDT, S. K. A comparison of four process-based models and a statistical regression model to predict growth of *Eucalyptus globulus* plantations. **Ecological Modelling**, v. 220, n. 5, p. 734-746, 2009.
- MIEHLE, P.; GROTE, R.; BATTAGLIA, M.; FEIKEMA, P. M.; ARNDT, S. K. Evaluation of a process-based ecosystem model for long-term biomass and stand development of *Eucalyptus globulus* plantations. **European Journal of Forest Research**, v. 129, n. 3, p. 377-391, 2010.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Potential and Actual Sugarcane Yields in Southern Brazil as a Function of Climate Conditions and Crop Management. **Sugar Tech**, v. 16, n. 3, p. 264-276, 2014.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Condicionamento Climático da Produtividade Potencial. In: **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. p. 478.
- RASCON, N. J. L. **Modelagem ecofisiológica do desenvolvimento do eucalipto na Amazônia**. 2012. 78f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- RIVINGTON, M.; BELLOCCHI, G.; MATTHEWS, K. B.; BUCHAN, K. Evaluation of three model estimations of solar radiation at 24 UK stations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 132, n. 3-4, p. 228-243, 2005.

- RYAN, M. G.; STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C. Factors controlling Eucalyptus productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1695-1703, 2010.
- SAKAI, A.; LARCHER, W. **Frost survival of plants**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, v.62, 1987.
- SANDS, P. J.; LANDSBERG, J. J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, v. 163, n. 1, p. 273-292, 2002.
- SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 37, n. 5, p. 1169-1188, 2001.
- SILVA, H. D. Da; FERREIRA, C. A.; CORRÊA, R. S.; BELLOTE, A. F. J.; TUSSOLINI, E. L. Alocação de Biomassa e Ajuste de Equações para Estimativa de Biomassa em Compartimentos Aéreos de *Eucalyptus benthamii*. **Boletim Pesquisas Florestais**, n. 49, p. 83-95, 2004.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M. de A.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010.
- TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; DOS REIS, E. F.; DARDENGO, M. C. J. D.; EFFGEN, T. A. M. Comportamento fisiológico de dois clones de Eucalyptus na época seca e chuvosa. **Cerne**, v. 13, n. 2, p. 149-159, 2007.
- TAYLOR, A. R.; CHEN, H. Y. H.; VANDAMME, L. A Review of Forest Succession Models and Their Suitability for Forest Management Planning. **Forest Science**, v. 55, n. 1, p. 23-36, 2009.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. 1. ed. Centerton: Laboratory of Climatology, 1955.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 1, p. 184-194, 1981.

- XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, p. 1-6, 2015. Disponível em: <<https://utexas.app.box.com/v/xavier-et-al-ijoc-data>>.
- XIE, Y.; WANG, H.; LEI, X. Application of the 3-PG model to predict growth of *Larix olgensis* plantations in northeastern China. **Forest Ecology and Management**, v. 406, p. 208–218, 2017.

3. DETERMINAÇÃO DAS QUEBRAS DE PRODUTIVIDADE (*YIELD GAPS*) DA CULTURA DO EUCALIPTO – ESTUDO DE CASO PARA REGIÕES PRODUTORAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL

Resumo

O eucalipto é o gênero florestal mais plantado no Brasil, tendo Minas Gerais como o estado que possui a maior área plantada com espécies deste gênero, sendo sua produtividade influenciada diretamente pelas condições edafoclimáticas e de manejo florestal dos clones cultivados. Desta maneira é importante um melhor conhecimento e quantificação dos fatores que condicionam e reduzem o crescimento e a produtividade das florestas, auxiliando os produtores e as empresas florestais no planejamento e nas tomadas de decisão quanto ao manejo florestal. Sendo assim, o conceito das quebras de produtividade (*yield gaps*), que vem sendo amplamente abordado a nível mundial, fornece base para a identificação das principais causas das perdas de produção, sejam elas de ordem hídrica ou de manejo. Desta forma, o objetivo deste estudo foi identificar a magnitude e as principais causas das perdas de produtividade (*yield gaps*) da cultura do eucalipto em diferentes regiões produtoras do estado de Minas Gerais. Para isso, foram utilizados dados de produtividade de eucalipto de 22 sítios do estado de Minas Gerais, no período de 2009 a 2016, considerando-se um ciclo médio de cultivo de 6,7 anos e plantios ocorridos entre 2002 e 2010. Foram utilizados dados meteorológicos diários no período de 2002 a 2016 fornecidos por uma empresa florestal e obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) das estações mais próximas aos sítios avaliados. As produtividades potencial (PP) e atingível (PA) foram estimadas pelo Modelo da Zona Agroecológica (MZA-FAO) adaptado e calibrado para a cultura do eucalipto. Foram calculados os três tipos de quebras de produtividade: total (QT); devido à deficiência hídrica (QDEF); e devido ao déficit de manejo florestal (QM). Nos 22 sítios avaliados, a deficiência hídrica foi o principal fator de quebra de produtividade, correspondendo a 77% da QT, enquanto que as perdas decorrentes do manejo florestal inadequado corresponderam a 23% da QT. Esses resultados evidenciam a necessidade de ações nas regiões produtoras analisadas que minimizem os impactos da deficiência hídrica na produtividade florestal. Dentre essas práticas, o uso de clones tolerantes a seca e melhorias nas condições do perfil do solo são as principais.

Palavras-chave: Modelos de simulação; Produtividade potencial; Produtividade atingível; Produtividade real; Risco climático; Deficiência hídrica

Abstract

The eucalyptus is the most planted forest genus in Brazil, being Minas Gerais state the one with the largest area planted with that. The edaphoclimatic conditions and forest management of the cultivated clones influence directly their yields. In this way, a better knowledge and quantification of the factors that affect forests growth and yield is important, helping forest producers and companies to plan and make decisions regarding forest management. Thus, the concept of yield gaps, which has been widely discussed in the world, provides a basis for identifying the main sources of production losses, caused by water or management deficiencies. Thus, the aim of this study was to identify the magnitude and major causes of yield gaps of eucalyptus in different producing regions of Minas Gerais state, Brazil. For this, we used eucalyptus yield data from 22 sites located in the state of Minas Gerais from 2009 to 2016, considering an average forest cycle of 6.7 years and plantings occurring between 2002 and 2010. Daily weather data were used from 2002 to 2016 provided

by a forestry company and obtained from the National Institute of Meteorology (INMET) from the nearest stations to the assessed sites. Potential (Y_p) and attainable (Y_a) yields were estimated by the Agroecological Zone Model (AEZ-FAO) adapted and calibrated for the eucalyptus crop. The three types of yield gaps were calculated: total yield gap (Y_{GT}), yield gap due to water deficit (Y_{GWD}) and yield gap due to forest management deficiencies (Y_{GM}). In the 22 sites, the water deficit was the main factor of yield gap, corresponding to 77% of the Q_T , while losses due to sub-optimum forest management corresponded to 23% of Y_{GT} . These results evidenced the need for actions in the assessed regions that minimize the impact of water deficit on forest yield. Among these actions, the use of eucalyptus clones more tolerant to drought and improvements in the soil profile conditions are the main ones.

Keywords: Simulation models; Potential yield; Attainable yield; Actual yield; Climatic risk; Water deficit

3.1. Introdução

O eucalipto no Brasil é o gênero florestal mais plantado, representando cerca de 75% da área de florestas plantadas no país, sendo Minas Gerais o estado que possui maior área plantada com espécies do gênero *Eucalyptus*, correspondendo a 1.841.943 ha, ou seja, 24,7% da área de eucalipto no Brasil (IBGE, 2016). Além disso, a produtividade do eucalipto é muito variável em decorrência das diferentes condições edafoclimáticas, dos diferentes clones cultivados e do manejo florestal (SENTELHAS; ELLI; FREITAS, 2017).

As quebras de produtividade do eucalipto no Brasil, decorrentes dos fatores mencionados acima, ainda são pouco conhecidas. Para que isso seja possível, é necessário que se desenvolvam estudos que contabilizem as diferenças entre os distintos tipos de produtividade.

A quebra de produtividade de culturas agrícolas e florestais, também conhecida por “*Yield Gap*”, representa a diferença entre os diferentes tipos de produtividade (Figura 3.1). É um conceito que vem sendo amplamente abordado em nível mundial, pois fornece base para a identificação das principais causas das perdas de produtividades das culturas, contribuindo para a definição de estratégias para aumentar a sustentabilidade de produção da região (SENTELHAS et al., 2016).

Os níveis de produtividade foram apresentados por Van Ittersum e Rabbinge (1997) e por Lobell, Cassman e Field (2009) em três diferentes tipos principais, sendo eles: produtividade potencial (PP), produtividade atingível (PA) e produtividade real (PR). A produtividade potencial representa a máxima produtividade a ser obtida por uma dada cultura em uma determinada localidade, sendo determinada pela radiação solar, temperatura, fotoperíodo, concentração de dióxido de carbono (CO_2) e características genotípicas da cultura. Já a produtividade atingível representa a máxima produtividade a ser atingida por

uma cultura de sequeiro sob condições ótimas de manejo, sendo, portanto, limitada pelas deficiências hídrica e nutricional. A PP e a PA são produtividades teóricas e podem ser determinadas por meio de experimentos de campo ou por modelos de simulação de culturas devidamente calibrados e testados, pois admitem a ausência da ação dos fatores redutores associados ao manejo das culturas (SENTELHAS; ELLI; FREITAS, 2017).

Por fim, tem-se a produtividade real (PR), a qual é obtida a nível de campo pelos produtores, sendo influenciada pelos fatores determinantes, limitantes e redutores tais como: pragas, doenças, plantas daninhas e outras condições de manejo, que são definidas pelo nível tecnológico de cada produtor (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; VAN ITTERSUM et al., 2013; SENTELHAS et al., 2016). Além da PR, outro tipo de produtividade que surgiu recentemente é a produtividade final (PF), sendo esta definida como aquela produtividade que é efetivamente contabilizada, após considerar aspectos relativos às perdas oriundas dos processos de colheita e transporte (SENTELHAS; ELLI; FREITAS, 2017). Devido à grande variabilidade temporal e espacial das condições climáticas do Brasil, torna-se necessário um maior conhecimento sobre quais são os fatores que condicionam e/ou limitam o crescimento das culturas, possibilitando a adoção de medidas que reduzam essas perdas de produtividade (SENTELHAS; ELLI; FREITAS, 2017).

Todas as reduções de produtividade, sejam elas causadas pelos fatores determinantes, limitantes ou redutores, podem ser manejadas pelos produtores por meio da definição do local de cultivo, bem como na escolha da época de plantio. Além disso, o preparo, a correção e o manejo do solo, afetam o sistema radicular das culturas, interferindo na capacidade de água disponível (CAD) do solo, e conseqüentemente nas relações hídricas das culturas. Finalmente, a fitossanidade da cultura interfere diretamente no desempenho da mesma, por meio da redução da área foliar, efeitos diretos na fotossíntese e limitação do crescimento das plantas ou competição interespecífica. Sendo assim, qualquer variação dos fatores determinantes, limitantes ou redutores, independentemente da cultura, impactará diretamente nos níveis de PP, PA e PR, seja no sistema irrigado ou de sequeiro (SENTELHAS et al., 2016).

Figura 3.1. Níveis e tipos de produtividade de acordo com seus respectivos fatores determinantes, limitantes e redutores. Adaptado de Sentelhas et al. (2016) e Sentelhas, Elli e Freitas (2017).

As quebras de produtividade, ou *yield gaps*, podem ser ocasionadas pela deficiência hídrica (Q_{DEF}), sendo determinada pela diferença entre a produtividade potencial (PP) e atingível (PA), ou pelo manejo agrícola ou florestal deficiente (Q_M), dada pela diferença entre a PA e a PR. Além disso, podem ser definidas ainda as perdas decorrentes dos desperdícios na colheita e no transporte (Q_{CT}), sendo esta calculada pela diferença entre a PR e a PF. O somatório de todas essas perdas define a quebra total de produtividade (Q_T) (SENTELHAS et al., 2016; SENTELHAS; ELLI; FREITAS, 2017).

Diversos estudos envolvendo o conceito de quebra de produtividade por meio da modelagem agrometeorológica têm sido realizados no Brasil e no mundo. No Brasil, esses estudos foram realizados para as culturas da cana-de-açúcar (DIAS, 2016; MONTEIRO; SENTELHAS, 2017), do feijão (MEIRELES et al., 2003), do girassol (MARIN; SENTELHAS; UNGARO, 2000; ROLIM; SENTELHAS; UNGARO, 2001), da mandioca (VISSÉS, 2016), do milho (BATTISTI; SENTELHAS; PILAU, 2012; AFFHOLDER et al., 2013), da soja (BATTISTI; SENTELHAS; PILAU, 2012; SENTELHAS et al., 2015), do sorgo (MARIN et al., 2006) e do trigo (BATTISTI; SENTELHAS; PILAU, 2012).

Apesar da predominância dos estudos de *yield gap* para culturas agrícolas, essa abordagem também pode ser aplicada ao setor florestal, como, por exemplo, para as espécies de eucalipto. Sendo assim, o entendimento dos fatores causais das perdas de produtividades

de florestas de eucalipto permitirá uma análise mais detalhada de quais são esses fatores e o quanto eles afetam a produtividade dos sítios produtores. Com base nisso, o objetivo deste estudo foi identificar a magnitude e as principais causas das quebras de produtividade (*yield gaps*) da cultura do eucalipto em diferentes regiões produtoras do estado de Minas Gerais.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Local de estudo

Os sítios florestais empregados neste estudo pertencem à empresa Vallourec Florestal LTDA, localizados no estado de Minas Gerais (Tabela 3.1 e Figura 3.2). Segundo a classificação climática de Köppen apresentada por Alvares et al. (2013), a classificação dos climas dos sítios estudados varia de tropical úmido com estação seca de inverno (Aw) a subtropicais com estação seca de inverno (Cwa – clima subtropical úmido com verão quente e Cwb – clima subtropical úmido com verão moderado) (Figura 3.2).

Os dados de produtividade do período de 2002 a 2016 foram obtidos para o grupo predominante de clones de eucalipto utilizados pela empresa, variando de acordo com cada sítio, considerando um ciclo de cultivo médio de 6,7 anos e os espaçamentos médios de plantio sendo de 3 x 3 m, com plantios tendo ocorridos entre 2002 e 2010 nas datas apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Características das localidades (região, latitude, longitude e altitude, capacidade de água disponível para perfil de solo de 3m, Incremento Médio Anual, número de dados de produtividade e datas de plantio observadas em cada sítio) empregadas na estimativa das quebras de produtividade do eucalipto, em diferentes regiões do estado de Minas Gerais.

Sítio	Região	Localidade	Lat	Lon	Alt	CAD	IMA _{med}	n	Data de Plantio
			Graus (°)		m	mm	m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹	-	(mês/ano)
1	CVL	ABT	-19,0	-45,2	690	174	41,0	53	12/02; 11/03; 12/04; 08/05; 11/06; 12/07
2		CUR	-19,0	-44,5	765	358	43,6	15	10/06; 12/07
3		CUR	-18,5	-44,4	709	182	29,5	123	11/01; 11/02; 08/03; 06/04; 12/05; 12/06; 04/07
4		FLX	-18,7	-45,0	630	120	36,9	63	11/01; 12/02; 10/03; 12/04; 07/05; 07/06;
5		FLX	-18,8	-44,7	669	149	44,4	30	12/03; 12/04; 06/05; 12/06
6		PAS	-19,0	-45,4	630	216	45,9	70	11/01; 11/02; 09/03; 08/04; 03/05; 04/06; 11/07
7		PRB	-19,3	-44,5	750	197	43,6	103	11/01; 11/02; 11/03; 09/04; 05/05; 07/06; 12/07
8		POU	-18,9	-45,0	655	179	38,9	47	11/01; 12/02; 12/03; 11/04; 07/05; 04/06
9	JPN	BRM	-17,0	-45,9	630	273	31,7	39	12/05; 11/06
10		JPR	-17,9	-46,1	835	144	31,9	84	11/01; 11/02; 12/03; 12/04; 01/05; 02/06; 03/07
11		JPR	-17,4	-46,1	568	196	34,4	34	10/03; 07/04; 11/05; 12/06; 11/07
12		JPR	-17,3	-46,1	570	358	32,7	26	12/06; 11/07
13		JPR	-17,3	-45,8	558	211	35,2	75	12/08; 05/09
14		JPR	-17,2	-45,9	552	249	30,5	31	04/08; 01/09
15		LAG	-17,7	-46,5	570	220	33,0	80	11/01; 09/02; 06/03; 05/04; 08/05; 06/06; 01/07
16	MTC	BCU	-17,3	-43,9	905	149	26,2	93	11/01; 12/02; 12/03; 05/04; 02/05; 02/06; 10/07
17		BCU	-17,2	-43,7	880	186	33,1	158	11/01; 11/02; 02/03; 11/04; 02/05; 07/06; 12/07
18		GRC	-17,1	-43,6	865	188	27,6	70	11/01; 11/03; 11/04; 11/05; 04/06; 03/07
19		MOC	-16,6	-44,0	840	180	25,5	68	12/01; 06/03; 12/04; 11/05; 11/06; 12/07
20		ODA	-17,3	-43,7	898	149	31,9	70	03/03; 03/04; 11/05; 06/06; 06/07
21	SCB	BNP	-17,9	-44,4	1000	186	30,5	57	10/09; 07/10
22		VDP	-17,6	-44,4	1055	165	48,2	24	04/09; 01/10

CVL – Curvelo (ABT – Abaeté; CUR – Curvelo; FLX – Felixlândia; PAS – Paineiras; PRB – Paraopeba; POU – Pompéu); JPN – João Pinheiro (BRM – Brasilândia de Minas; JPR – João Pinheiro; LAG – Lagoa Grande); MTC – Montes Claros (BCU – Bocaiúva; GRC – Guaraciama; MOC – Montes Claros; ODA – Olhos d’Água); SCB – Serra do Cabral (BNP – Buenópolis; VDP – Várzea de Palma).

Figura 3.2. Sítios produtores de eucalipto utilizados nas estimativas das quebras de produtividade no estado de Minas Gerais.

3.2.2. Dados meteorológicos

Foram utilizados dados de chuva diários do período de 2002 a 2016 para os sítios de produção da empresa Vallourec Florestal LTDA, enquanto que os dados de temperatura do ar (mínima e máxima), insolação, umidade relativa do ar, chuva e velocidade do vento a 10 m de altura, para o mesmo período, foram obtidos junto ao Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) das estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), mais próximas aos sítios avaliados. Os dados faltantes foram preenchidos com os dados em ponto de grade apresentados por Xavier, King e Scanlon (2015), disponíveis para o período de 1980-2017, com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (BENDER, 2017).

A estimação da irradiação solar global (Q_g) foi obtida segundo o modelo proposto por Angström (1924) e, posteriormente, modificado por Prescott (1940) (Equação 1):

$$Q_g = \left(a + b \cdot \frac{n}{N} \right) \cdot Q_o \quad (1)$$

$a = 0,29 \cdot \cos \phi; \quad b = 0,52$

em que: Q_o a irradiação solar incidente no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); n a insolação (h dia^{-1}); N a duração máxima de brilho solar ou fotoperíodo (h dia^{-1}); e a e b os coeficientes empíricos específicos, estimados segundo Glover e McCulloch (1958).

3.2.3. Estimação da produtividade potencial (PP) e atingível (PA)

A produtividade potencial (PP) foi estimada por meio do Modelo da Zona Agroecológica – FAO (MZA), apresentado por Doorenbos e Kassam (1994) e adaptado como descrito no Capítulo 1, seguindo os parâmetros obtidos para o clone A1:

$$PP_i = [Fb_i \times C_{IAF_i} \times C_{R_i} \times C_{C_i}] \cdot \prod_{i=1}^n (f_{\text{frost}})_i \quad [\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}] \quad (2)$$

em que Fb é a produtividade fotossintética bruta de matéria seca de uma cultura hipotética ($\text{kg ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$), C_{IAF} é a correção para o efeito do índice de área foliar da cultura, C_R é a correção para a respiração de manutenção da cultura, C_C é a correção para o índice de colheita, i é o i -ésimo dia do ciclo, e n é a duração do ciclo até a colheita ou corte do eucalipto, variando entre 6 a 7 anos, e f_{frost} a função de penalização da produtividade do eucalipto por geada.

A produtividade potencial acumulada (PPac) foi obtida por meio do somatório dos valores diários de PP e pela penalização da ocorrência de geada pela função f_{frost} :

$$PPac = \sum_{i=1}^{ND} \left[\left(\frac{PP/1000}{\rho_m} \right) \cdot f_{\text{frost}} \right]_i \quad \begin{pmatrix} \text{se } i \leq 2 \text{ anos; } f_{\text{frost}} = f_{\text{frost}} \\ \text{se } i > 2 \text{ anos; } f_{\text{frost}} = 1 \end{pmatrix} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}] \quad (3)$$

em que ND é o número de dias do ciclo do eucalipto e ρ_m a densidade da madeira (t m^{-3}).

A produtividade atingível (Equações 4 e 5) é dada pelo efeito da deficiência hídrica na produtividade potencial, ponderado por um fator de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (ky), em cada fase de seu crescimento, e pela função de mortalidade por deficiência hídrica extrema (f_{wd}):

$$PA_i = [1 - ky_i \cdot (1 - ETr_i / ETc_i)] \cdot PP_i \quad [\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}] \quad (4)$$

$$PA_{\text{adj}_i}(m) = PA_i(m) \cdot \prod_{m=1}^M (f_{wd})_m \quad [\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}] \quad 1 \leq m \leq M \quad (5)$$

em que M é o número de meses que o eucalipto atinge a idade de colheita ou corte, fwd a função de mortalidade por deficiência hídrica e i é o i -ésimo dia do ciclo.

A produtividade atingível acumulada (PAac) foi obtida por meio do somatório dos valores diários de PA:

$$PAac = \sum_{i=1}^{ND} \left[\left(\frac{PA}{1000} \right) \cdot f_{frost} \right]_i \left(\begin{array}{l} \text{se } i \leq 2\text{anos}; f_{frost} = f_{frost} \\ \text{se } i > 2\text{anos}; f_{frost} = 1 \end{array} \right) \left[m^3 \cdot ha^{-1} \right] \quad (6)$$

O déficit hídrico relativo é dado pela relação $(1-ETr/ETc)$, em que ETr é a evapotranspiração real e ETc a evapotranspiração máxima da cultura. A estimação da ETo foi feita com base no método de Penman-Monteith, conforme recomendado por Allen et al. (1998). A ETr foi estimada pelo balanço hídrico climatológico sequencial de Thornthwaite e Mather (1955) para a cultura do eucalipto, considerando-se a CAD máxima de cada sítio. As CADs foram variáveis ao longo do ciclo, as quais foram obtidas por meio de levantamentos pedológicos realizados pela empresa florestal (Tabela 3.1).

Para avaliar o crescimento da floresta, utilizou-se o incremento médio anual (IMA) na data final do ciclo de cada localidade. O IMA mede o crescimento médio da floresta até uma determinada idade do ciclo e facilita a comparação do crescimento das árvores com diferentes idades, sendo dado por:

$$IMA_t = \frac{Vol_t}{Idade_t} \quad \left[m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1} \right] \quad (7)$$

em que IMA_t é Incremento médio anual no período t ; Vol_t o volume no período t ($m^3 \cdot ha^{-1}$) e $Idade_t$ a idade do talhão no período t , em anos.

3.2.4. Quebras de produtividade ou *Yield Gaps* do eucalipto

Os resultados oriundos do modelo de simulação (PP e PA), juntamente com os dados de PR da empresa florestal foram empregados para a determinação dos seguintes tipos de quebras de produtividade: total (Q_T); devido à deficiência hídrica (Q_{DEF}); e devido ao déficit manejo florestal (Q_M):

$$Q_T = IMA_{PPacf} - IMA_{PRf} \quad (8)$$

$$Q_{DEF} = IMA_{PPacf} - IMA_{PAacf} \quad (9)$$

$$Q_M = IMA_{PAacf} - IMA_{PRf} \quad (10)$$

em que: IMA_{PPacf} é o incremento médio anual potencial final ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$); IMA_{PAacf} o incremento médio anual atingível final ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$); e IMA_{PRf} o incremento médio anual real final observada no campo ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$).

3.3. Resultados e Discussão

Na Figura 3.3 são mostrados exemplos da variação temporal das produtividades potencial (PP) e atingível (PA), assim como os valores de excedente e deficiência hídrica durante o ciclo do eucalipto para alguns sítios produtores em Minas Gerais, estimados pelo modelo MZA-FAO adaptado.

Figura 3.3. Exemplos da variação temporal da produtividade potencial (PP) e da produtividade atingível (PA), estimadas pelo Modelo da Zona Agroecológica adaptado para a cultura do eucalipto, e do extrato do balanço hídrico climatológico, com os valores mensais de excedente hídrico (EXC) e de déficit hídrico (DEF), nas localidades de Curvelo (A, Sítio 2), Guaraciama (B, Sítio 18), João Pinheiro (C, Sítio 12) e Buenópolis (D, Sítio 21), no estado de Minas Gerais, para o período entre 01/2007 e 12/2014.

Observa-se na Figura 3.3 que a PP é praticamente a mesma nas diferentes localidades, porém, a PA varia bastante já que a deficiência hídrica que se acumula ao longo do ciclo do eucalipto varia de um local para o outro. Em Guaraciama (Figura 3.3B), por

exemplo, a deficiência hídrica acumulada durante todo o ciclo do eucalipto foi de cerca de 4090 mm, enquanto que em Curvelo (Figura 3.3A), a deficiência hídrica acumulada foi inferior, da ordem 2250 mm, considerando-se um ciclo médio de 80 meses. Para João Pinheiro (Figura 3.3C) e Buenópolis (Figura 3.3D), os valores de DEF foram de 2980 e 3270 mm, respectivamente. A maior deficiência hídrica acumulada em Guaraciama resultou em uma maior perda de produtividade, de 61% em relação a PP, enquanto que em Curvelo essa perda foi menor, de 34%. As demais localidades apresentaram perdas da ordem de 45% para João Pinheiro e 51% para Buenópolis.

Considerando-se que os 22 sítios analisados estejam em regiões geográficas próximas, as condições edafoclimáticas de cada um deles são diferentes, o que reflete diretamente nas perdas de produtividade em decorrência dos fatores climáticos (RYAN et al., 2010; GONÇALVES et al., 2014; BINKLEY et al., 2017). Exemplo disso é a PP, que variou entre $695 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ em Curvelo (Sítio 2) e $724 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ em João Pinheiro (Sítio 12), enquanto que a PA variou entre $278 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ em Guaraciama (Sítio 18) e $458 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ em Curvelo. (Figura 3.3)

Analisando o déficit hídrico acumulado, no período de 2002 a 2016 (DEFac, Figura 3.4A) ao longo do ciclo do eucalipto (Tabela 3.2), observa-se que as regiões de Montes Claros e Serra do Cabral apresentaram os maiores valores, respectivamente 4130 mm e 4361 mm, e que a região de Serra do Cabral, composta pelos sítios 21 e 22, apresentou os máximos acumulados, chegando a DEFac de 4793 mm para o sítio 21 (Tabela 3.2), ainda que para esta localidade foi considerado ciclo médio de 5,1 anos, devido à menor disponibilidade dos dados de volume da madeira observados. Na região de Montes Claros, o sítio 13 apresentou maior DEFac, de 4496 mm. Já os máximos de DEFac para as regiões de Curvelo e João Pinheiro foram de 3489 mm e 3942 mm para os sítios 4 e 14, respectivamente.

Além de apresentarem maiores acumulados de deficiência hídrica, as regiões de Montes Claros e Serra do Cabral apresentaram os menores acumulados médios de excedente hídrico (EXCac, Figura 3.4B), estes entre 2709 mm e 2333 mm, respectivamente (Tabela 3.2). Porém o sítio 2, localizado na região de Curvelo, foi o sítio de menor EXCac em relação aos 22 sítios, com 2218 mm acumulados em um ciclo médio de 6,9 anos, mesmo a região de Curvelo tendo apresentado, em geral, maiores valores de EXCac em relação às demais regiões, com média de 3558 mm acumulados entre os sítios. Foi observado para o sítio 10, localizado na região de João Pinheiro, tanto o maior DEFac quanto o maior EXCac da região, com acumulados de 3942 mm e 4737 mm, respectivamente, considerando-se um ciclo médio de 6,9 anos. A variação tanto da deficiência hídrica quanto do excedente é diretamente

influenciada pela variação interanual da precipitação nos sítios e as respostas nas produtividades das culturas variam substancialmente entre os diferentes clones e suas tolerâncias aos períodos muito secos ou muito úmidos (STAPE et al., 2010).

Tabela 3.2. Ciclo médio, déficit hídrico acumulado (DEF), excedente hídrico acumulado (EXC) e evapotranspiração relativa média (ET) nos 22 sítios produtores do estado de Minas Gerais, no período de cultivo de 2002 a 2016*.

Sítio	Região	Sítio	Ciclo médio	DEFac	EXCac	ETrel
			anos	----- mm -----	-	
1	Curvelo	Abaeté	7,0	3256	3911	0,65
2		Curvelo	6,9	2452	2218	0,73
3		Curvelo	7,0	3223	2671	0,63
4		Felixlândia	7,0	3489	4479	0,62
5		Felixlândia	7,0	3393	3460	0,62
6		Paineiras	7,0	2864	4010	0,68
7		Paraopeba	7,1	3026	3638	0,66
8		Pompéu	6,9	3115	4075	0,66
9	João Pinheiro	Brasilândia de Minas	7,0	3479	2651	0,65
10		João Pinheiro	6,9	3942	4737	0,61
11		João Pinheiro	6,9	3901	3813	0,62
12		João Pinheiro	7,0	3063	2785	0,70
13		João Pinheiro	6,0	3690	2983	0,63
14		João Pinheiro	6,1	3486	2501	0,65
15		Lagoa Grande	7,0	3611	4116	0,64
16	Montes Claros	Bocaiúva	6,8	3679	3400	0,61
17		Bocaiúva	6,8	4223	2544	0,56
18		Guaraciama	7,0	4250	2528	0,56
19		Montes Claros	6,9	4496	2407	0,55
20		Olhos d'Água	7,0	4001	2667	0,57
21	Serra do Cabral	Buenópolis	6,1	3930	2267	0,59
22		Várzea de Palma	5,1	4793	2399	0,53
Média			6,7	3607	3194	0,62

* O período de cultivo variou de sítio para sítio de acordo com os dados de produtividade disponíveis para os mesmos dentro do intervalo entre 2002 e 2016.

Figura 3.4. Valores médios acumulados de deficiência hídrica (DEFac, A) de excedente hídrico (EXCac, B) e média da evapotranspiração relativa (ETrel, C), durante o ciclo do eucalipto de sete anos, em 22 sítios produtores do estado de Minas Gerais, para o período de 2012 a 2016.

A evapotranspiração relativa (ETrel), dada pela relação entre a evapotranspiração real (ETr) e a evapotranspiração máxima (ETc) da cultura do eucalipto, é uma boa maneira de quantificar o efeito da deficiência hídrica na produtividade, já que quanto menor o seu valor, maior será esse efeito (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Como esperado, as regiões de maior DEFac foram as que registraram os menores valores de ETrel médio entre os sítios (Figura 3.4C), chegando a 0,56 para a região da Serra do Cabral e 0,57 para a região de Montes Claros (Tabela 3.2), enquanto que nas regiões de Curvelo e João Pinheiro a ETrel foi de 0,66 e 0,64, respectivamente. Os maiores valores de ETrel ocorreram nos sítios Curvelo (Sítio 2) e João Pinheiro (Sítio 12), com seus valores atingindo 0,73 e 0,70, respectivamente.

Não houve diferenças entre as produtividades potenciais (PP) e os incrementos de produtividade potenciais (IMA_{PP}) estimados (Figura 3.5A), devido principalmente à proximidade dos sítios, resultando em pouca variação nas condições de temperatura do ar, irradiação solar e fotoperíodo. Os valores de PP oscilaram de 539 m³ ha⁻¹ a 765 m³ ha⁻¹ para os sítios Várzea de Palma (Sítio 22) e Brasilândia de Minas (Sítio 9), respectivamente, enquanto que os valores de IMA variaram entre 103 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e 110 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ para os sítios Curvelo (Sítio 3) e Montes Claros (Sítio 19), respectivamente (Tabela 3.3). As diferenças entre as PPs e os IMA_{PPs} devem-se ao fato de que os sítios apresentaram duração do ciclo diferentes durante o período analisado. O menor valor estimado de PP para o sítio 22 se deveu ao fato do ciclo ter sido menor (5,1 anos) que nos demais sítios, porém, analisando o incremento médio anual para este sítio (IMA_{PP} ≈ 106 m³ ha⁻¹ ano⁻¹), verifica-se que não houve tanta variação em relação aos demais sítios analisados (Tabela 3.3). Além disso, os maiores valores de IMA_{PP} concentraram-se na região de João Pinheiro, com IMA_{PP} médio de 109 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, seguida pela região de Montes Claros (107 m³ ha⁻¹ ano⁻¹), Serra do Cabral (106 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) e Curvelo (105 m³ ha⁻¹ ano⁻¹), com ciclos variando de 5,6 a 7,0 anos nas regiões de Serra do Cabral e Curvelo, respectivamente. Esses valores foram superiores aos encontrados por Stape et al. (2010), em um estudo da produtividade potencial de eucalipto em oito diferentes localidades produtoras brasileiras, distribuídas nos estados de BA, ES, MG e SP, com IMA_{PPs} variando de 28 t ha⁻¹ ano⁻¹ (cerca de 56 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) em Aracruz, ES, a 36 t ha⁻¹ ano⁻¹ (aproximadamente 72 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) em Eunápolis, BA, considerando densidade média da madeira de 0,50 t m⁻³ e ciclo de crescimento de seis anos. Stape et al. (2010) mencionaram que os oito sítios estudados podem não abranger toda a região produtora de eucalipto no Brasil, sendo necessária cautela na extrapolação dos resultados encontrados, e cita como exemplo, falta de resposta do crescimento de eucaliptos em relação a diferentes dosagens de

fertilizantes. Isto pode indicar que as diferenças nos valores de IMA_{PP} encontrados neste estudo e por Stape et al. (2010) estão dentro do aceitável.

Os valores de PP estimados também foram superiores aos encontrados por Sentelhas, Elli e Freitas (2017). Tal diferença foi também ocasionada pela duração do ciclo dos eucaliptos usados nas simulações, variando entre 48 a 58 meses, enquanto que no presente estudo, o ciclo médio foi de 80 meses. Além disso, tanto as estimativas da PP quanto da PA são específicas de cada localidade, justamente por variarem em função do clima, manejo utilizado e da duração do ciclo de crescimento da cultura, além da variação das características do solo, que afetam diretamente na disponibilidade de água para as árvores (VAN WART et al., 2013). Isso é especialmente importante nas regiões tropicais, onde fatores seletivos como escolha de genótipos mais tolerantes a pragas e doenças, secas e risco de incêndio são importantes para atingir o potencial produtivo das plantações (GONÇALVES et al., 2017). Ademais, a mensuração da produtividade potencial em culturas florestais é praticamente incipiente e de difícil quantificação, sendo a opção o emprego de modelos de simulação para a estimação desta produtividade (SENTELHAS; ELLI; FREITAS, 2017).

A variação da deficiência hídrica entre os sítios analisados provocou diferenças entre os valores de PA e IMA_{PA} das localidades (Tabela 3.3 e Figura 3.4B), com os sítios localizados nas regiões de Curvelo e João Pinheiro sendo aqueles que registraram as menores perdas de produtividade devido ao déficit hídrico, com PAs médias de $392 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $356 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente, seguidos pelos sítios localizados nas regiões de Montes Claros, com PA média de $298 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, e Serra do Cabral, com PA média de $274 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. O sítio de Várzea de Palma (Sítio 22), além de possuir menor PP, foi também aquele de menor PA, da ordem de $246 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, enquanto que o sítio 2 foi o que apresentou a maior PA ($470 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) em relação aos demais sítios do estudo (Tabela 3.3). Em relação aos IMA_{PA} s, o maior valor foi também registrado para o sítio de Curvelo (Sítio 2), com IMA_{PA} igual a $68 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, mas o menor não foi para o sítio 22, sendo o sítio 14 (Montes Claros) aquele que menor apresentou valor de IMA_{PA} , este de $41 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Assim, como para o IMA_{PA} , o IMA_{PR} (Figura 3.5C), em média, variou cerca de $12 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ entre as regiões, com valores oscilando entre $29 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para a região de Montes Claros e $41 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para a região de Curvelo, indicando que as condições de manejo entre as regiões podem variar, já que não se mantiveram as proporções observadas para PA (Tabela 3.3). As maiores variações de IMA_{PR} foram entre os sítios da região de Serra do Cabral, onde o sítio de Buenópolis (Sítio 21) teve IMA_{PR} médio de $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto o sítio 22 (Várzea de Palma) registrou IMA_{PR} médio de $48 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, ou seja,

uma diferença de $18 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ entre os dois sítios. Já as demais regiões apresentaram diferenças médias entre os sítios menos e mais produtivos de aproximadamente $16 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para a região de Curvelo (de $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio 3 a $46 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio 6), de $7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para os sítios da região de Montes Claros (de $26 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio 19 a $33 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio 17) e de $5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para os sítios da região de João Pinheiro, com IMA_{PR} ficando entre $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio 14 e $35 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio 13. É importante destacar que a menor idade das árvores da região da Serra do Cabral, principalmente para o sítio de Várzea de Palma (Sítio 22), não significou em menores valores de IMA_{PR} , apresentando o maior valor de IMA_{PR} entre os sítios analisados. Segundo Gonçalves et al. (2017), os valores de IMA_{PR} deste estudo estão dentro da média esperada (entre 20 e $45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para as regiões com classificações climáticas semelhantes (Figura 3.2).

Em relação às quebras de produtividade ocasionadas pela deficiência hídrica (Figura 3.6A), para a região de Curvelo, o sítio 2 foi o que apresentou o menor valor ($Q_{\text{DEF}} = 37 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), enquanto o sítio 4 foi o de maior valor, na ordem de $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Para a região de Montes Claros, o sítio de menor Q_{DEF} foi o sítio 16, com $58 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto para o sítio 19, a Q_{DEF} foi de $69 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 3.3). Já para a região de João Pinheiro, a quebra de produtividade devido à deficiência hídrica variou entre $46 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio 12 e $61 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio 10. Na região da Serra do Cabral, por sua vez, os valores de Q_{DEF} variaram entre $58 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $66 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para os sítios 21 e 22, respectivamente (Tabela 3.3).

Em geral, os menores valores de Q_{DEF} foram observados nos sítios que apresentaram deficiências hídricas acumuladas ao longo do ciclo menores e vice-versa. Com exceção para a região da Serra do Cabral, os sítios que apresentaram os maiores valores absolutos de Q_{DEF} não foram aqueles que tiveram a maior porcentagem de quebra de produtividade relativa devido à deficiência hídrica (Tabela 3.3, Figura 3.6C). Por exemplo, para a região de Curvelo, apesar de o sítio 4 ter apresentado a maior Q_{DEF} em valores absolutos ($55 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), essa quebra em relação ao Q_{T} foi de 80%, enquanto que no sítio 5 a Q_{DEF} absoluta foi de $54 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, representando 87% da Q_{T} . Isto também evidencia que mesmo que as quebras absolutas de produtividade sejam na mesma ordem de grandeza, as quebras relativas poderão variar consideravelmente.

Figura 3.5. Incrementos médios anuais (IMA) das produtividades potencial (PP, A), atingível (PA, B) e real (PR, C) do eucalipto em 22 sítios produtores do estado de Minas Gerais, para o período de 2012 a 2016.

Grande parte da perda de produtividade de eucaliptos está relacionada à deficiência hídrica durante o ciclo de cultivo que influencia diretamente na adaptação e desempenho dos clones cultivados (STAPE et al., 2010; BINKLEY et al., 2017; GONÇALVES et al., 2017). Estudos realizados por Stape et al. (2010) e Ryan et al. (2010) mostram que o uso da irrigação aumenta substancialmente a produção da madeira de eucalipto, com respostas de crescimento variando entre 15 e 35%. O fornecimento de água durante o ciclo do eucalipto também aumentou o crescimento da madeira de 20 a 80% (STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008). Hakamada et al. (2017) verificaram também que regiões com menor disponibilidade hídrica possibilitam maior incremento do potencial de estresse e redução da produtividade de plantações de eucalipto.

As altas produtividades do eucalipto são frequentemente associadas às altas taxas de uso da água, gerando preocupações sobre o rendimento hídrico das bacias hidrográficas, especialmente em locais onde as plantações de eucalipto substituíram a vegetação nativa de baixa estatura (GONÇALVES et al., 2017). Além disso, um bom planejamento estratégico realizado pelas empresas florestais, como uma preparação adequada do local por meio da conservação da água, controle da competição entre as árvores, entendimento do consumo hídrico e eficiência do uso da água são também fatores importantes que podem auxiliar nas decisões silviculturais para a redução do estresse hídrico durante o ciclo das culturas (GONÇALVES et al., 2017).

As quebras de produtividade decorrentes do manejo florestal (Q_M) se devem a uma série de perdas que ocorrem desde o preparo do solo e plantio, passando pela escolha de mudas, combate às pragas e doenças, controle de plantas daninhas, desrama e desbaste, até o uso de maquinário para a colheita (GONÇALVES et al., 2004, 2013, 2017; STAPE et al., 2010). Os valores de Q_M (Figura 3.6B) para a região de Curvelo, variaram entre $8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para os sítios 5 e 2, respectivamente, correspondendo a uma quebra de produtividade relativa de manejo (Q_{RM}) de 13% para o sítio 5 e 40% para o sítio 2, em relação à Q_T . Já na região de Montes Claros, essa variação foi de $8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio 17 a $22 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio 16, correspondendo a uma Q_M de 11% a 28% em relação à Q_T (Tabela 3.3). A região de João Pinheiro foi a que apresentou os maiores valores de Q_{RM} , variando de 19 a 40% respectivamente para os sítios 11 e 12, o que corresponde a valores absolutos de $14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $31 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para esses dois sítios. Por sua vez, na região da Serra do Cabral, para Várzea de Palma (Sítio 22), a quebra de produtividade devido ao manejo foi nula, enquanto que no sítio 21 esse valor chegou a $19 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Mesmo que a porcentagem de quebra de produtividade do eucalipto por déficit de manejo tenha sido menor que a quebra de produtividade devido ao déficit hídrico, existem práticas silviculturais que podem minimizar essas quebras. Dentre elas destacam-se o preparo do local, fertilização, espaçamento e controle de plantas daninhas (GONÇALVES et al., 2013), aplicação de programas de pesquisa de melhoramento genético (RESENDE et al., 2012) e também redução no número de árvores plantadas por hectare para reduzir a mortalidade relacionada a períodos de seca (HAKAMADA et al., 2017). Battie-Laclau et al. (2016), estudando diferentes regimes hídricos e de fertilização, encontraram produção de madeira, três anos após o plantio, 173% maior em árvores adubadas com K e 79% maior em árvores adubadas com Na do que em árvores sem adição desses fertilizantes K e Na, que se deveu à melhoria na eficiência do uso da água.

Em relação às quebras de produtividade total (Q_T), com exceção da região de Montes Claros, os menores valores foram observados nos sítios mais produtivos, ou seja, com maiores valores de PR, enquanto que os sítios menos produtivos apresentaram maiores valores de Q_T e menores valores de PR (Tabela 3.3). A Q_T para a região de Curvelo variou de $58 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio de Paineiras (Sítio 6 com $\text{IMA}_{\text{PR}} = 46 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) a $74 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio de Curvelo (Sítio 3 com $\text{PR} = 29 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Já para a região de Montes Claros, a Q_T variou de $74 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio de Olhos d'Água (Sítio 20) a $85 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio de Montes Claros (Sítio 19), com valores de incremento médio anual real (IMA_{PR}) de $32 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $26 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente. Para a região de João Pinheiro, a Q_T variou de $74 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ a $79 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para os sítios 13 ($\text{IMA}_{\text{PR}} = 35 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e 14 ($\text{IMA}_{\text{PR}} = 30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), respectivamente. Por fim, para a região da Serra do Cabral, a Q_T variou entre $66 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio 22 e $77 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o sítio 21.

As regiões com as maiores perdas de produtividade média total (Q_T) e suas respectivas perdas devido à deficiência hídrica (Q_{DEF}) e ao déficit de manejo florestal (Q_M) foram: Montes Claros ($Q_T = 78 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, $Q_{\text{DEF}} = 64 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $Q_M = 14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), João Pinheiro ($Q_T = 76 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, $Q_{\text{DEF}} = 56 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $Q_M = 20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), Serra do Cabral ($Q_T = 71 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, $Q_{\text{DEF}} = 62 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $Q_M = 9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e Curvelo ($Q_T = 64 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, $Q_{\text{DEF}} = 48 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $Q_M = 16 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Apesar da região de Montes Claros ter apresentado maiores perdas de produtividade absolutas, a região da Serra do Cabral foi a que apresentou as maiores perdas relativas decorrentes do déficit hídrico, de 88%, comparados aos 82% da região de Montes Claros. Já a região de João Pinheiro teve 27% da sua produtividade impactada por condições de manejo florestal sub-

ótimo, enquanto que a região de Montes Claros apresentou perdas de 18% devido ao manejo deficiente.

As quebras de produtividade relativa causadas pelo déficit hídrico (Q_{RDEF}) foram maiores em todos os sítios e todas as regiões analisadas do que as quebras advindas do manejo florestal deficiente (Q_{RM}), representando uma média de 77% de perda por DEF e 23% por manejo inadequado (Figura 3.6C, Tabela 3.3). A mesma tendência foi observada por Sentelhas, Elli e Freitas (2017), estudando cinco diferentes localidades brasileiras produtoras de eucalipto, nas quais, em média, 75% das quebras de produtividade do eucalipto foram causadas pela deficiência hídrica, enquanto que os outros 25% foram decorrentes do déficit de manejo florestal. Uma possível justificativa pela menor porcentagem de quebras de produtividade advindas do manejo florestal inadequado está que desde a década de 60 houve um avanço expressivo nas práticas silviculturais, principalmente quanto ao uso de mudas de maior qualidade, alteração na densidade de plantio, maior controle integrado de plantas daninhas, pragas e doenças, além de recomendações criteriosas de fertilização, práticas que melhoraram a gestão da água e aumentaram a resiliência da espécie à seca (GONÇALVES et al., 2013, 2017).

Analisando a penalização da produtividade das culturas agrícolas devido ao déficit hídrico e de manejo durante o ciclo de cultivo, Sentelhas et al. (2015) também encontraram quebras de produtividade causadas pela deficiência hídrica maiores que as quebras causadas pelo manejo agrícola inadequado para a cultura da soja, de 74% e 26% respectivamente. Considerando outras culturas agrícolas em condições brasileiras, Dias (2016) encontrou também para a cultura da cana-de-açúcar, maior quebra de produtividade causada pela deficiência hídrica, sendo esta de 72% da Q_T . Já a quebra devido ao manejo inadequado variou de região para região de acordo com as práticas adotadas pelos produtores, com média de 28% da Q_T , mas chegando a 46% nos estados de Tocantins e Bahia. Resultados similares foram obtidos por Monteiro e Sentelhas (2017) para a cultura da cana-de-açúcar, onde observaram que, em média, a deficiência hídrica foi responsável por 76% da quebra total de produtividade, enquanto o manejo agrícola representou 24%. Porém, analisando separadamente as regiões brasileiras, Monteiro e Sentelhas (2017), observaram diferenças nas quebras de produtividade médias, sendo que para a região Nordeste, a quebra de produtividade devido ao déficit hídrico foi de 86%, enquanto que para a região Sul do país, essa quebra foi de 48%, mostrando que a produtividade nesta região é mais impactada pelas condições de manejo agrícola deficiente, além da ocorrência de geadas.

Figura 3.6. Quebra de produtividade média do eucalipto devido ao déficit hídrico (Q_{DEF} , A), manejo florestal (Q_M , B) e quebra de produtividade total (Q_T , C) em 22 sítios produtores do estado de Minas Gerais, para o período de 2012 a 2016.

Tabela 3.3. Produtividades potencial (PP), atingível (PA) e real (PR), incremento médio anual potencial (IMAPP), atingível (IMAPA) e real (IMAPR), quebras absolutas de produtividade devido ao déficit hídrico (Q_{DEF}), manejo (Q_M) e total (Q_T), quebras relativas de produtividade devido à deficiência hídrica (Q_{RDEF}) e déficit de manejo florestal (Q_{RM}) nos 22 sítios produtores do estado de Minas Gerais, no período de 2012 a 2016.

Sítio	Região	Sítio	Ciclo anos	PP -----	PA m³ ha⁻¹	PR -----	IMAPP	IMAPA	IMAPR	Q _{DEF}	Q _M	Q _T	Q _{RDEF}	Q _{RM}
							m³ ha⁻¹ ano⁻¹			-----%-----				
1	Curvelo	Abaeté	7,0	730,9	383,7	284,9	105,1	55,2	41,0	49,9	14,2	64,1	78	22
2		Curvelo	6,9	723,2	469,6	300,3	104,9	68,2	43,6	36,8	24,6	61,4	60	40
3		Curvelo	7,0	725,8	370,6	207,1	103,3	52,7	29,5	50,5	23,3	73,8	68	32
4		Felixlândia	7,0	734,8	350,7	257,4	105,2	50,2	36,9	55,0	13,4	68,4	80	20
5		Felixlândia	7,0	749,2	370,1	311,9	106,6	52,7	44,4	53,9	8,3	62,2	87	13
6		Paineiras	7,0	723,5	411,1	319,1	104,2	59,2	45,9	45,0	13,2	58,2	77	23
7		Paraopeba	7,1	735,4	401,2	307,3	104,3	56,9	43,6	47,4	13,3	60,7	78	22
8		Pompéu	6,9	714,1	378,6	267,6	103,8	55,0	38,9	48,8	16,1	64,9	75	25
9	João Pinheiro	Brasilândia de Minas	7,0	765,2	383,0	221,4	109,7	54,9	31,7	54,8	23,1	77,9	70	30
10		João Pinheiro	6,9	747,5	324,8	221,1	107,9	46,9	31,9	61,0	15,0	76,0	80	20
11		João Pinheiro	6,9	751,2	335,1	237,9	108,7	48,5	34,4	60,2	14,1	74,3	81	19
12		João Pinheiro	7,0	763,4	443,6	228,7	109,0	63,4	32,7	45,7	30,7	76,4	60	40
13		João Pinheiro	6,0	648,0	305,2	209,2	109,0	51,3	35,2	57,6	16,1	73,8	78	22
14		João Pinheiro	6,1	673,6	339,2	187,0	109,7	55,2	30,5	54,4	24,8	79,2	69	31
15		Lagoa Grande	7,0	749,9	361,8	230,0	107,6	51,9	33,0	55,7	18,9	74,6	75	25
16	Montes Claros	Bocaiúva	6,8	722,2	330,0	178,1	106,1	48,5	26,2	57,6	22,3	79,9	72	28
17		Bocaiúva	6,8	729,6	282,8	225,7	107,1	41,5	33,1	65,6	8,4	74,0	89	11
18		Guaraciama	7,0	751,6	294,2	193,8	107,1	41,9	27,6	65,2	14,3	79,5	82	18
19		Montes Claros	6,9	757,0	283,3	174,9	110,5	41,4	25,5	69,1	15,8	85,0	81	19
20		Olhos d'Água	7,0	737,1	300,0	222,8	105,4	42,9	31,9	62,5	11,0	73,6	85	15
21	Serra do Cabral	Buenópolis	6,1	657,7	303,1	187,0	107,1	49,3	30,5	57,7	18,9	76,6	75	25
22		Várzea de Palma	5,1	539,4	203,8	203,8	105,9	48,2	48,2	65,9	0,0	65,9	100	0
Média			6,7	719,5	346,6	235,3	106,7	51,6	35,3	55,5	16,4	71,8	77	23

Para a cultura da mandioca Visses (2016), utilizando 13 localidades em diferentes estados brasileiros, encontrou valores de quebra de produtividade variáveis. Para as localidades das regiões Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste, a maior porcentagem de quebras de produtividade foi devido à deficiência hídrica (61%, 77% e 88%, respectivamente), enquanto que para as localidades da região Norte, a maior porcentagem de quebra de produtividade foi causada por manejo agrícola inadequado, representando 82%. Já para as localidades da região Sul, as porcentagens de quebra de produtividade são equilibradas, com 45% para Q_{RDEF} e 55% para Q_{RM} .

Duarte (2018) usando três tipos de solo para a estimativa das quebras de produtividade para a cultura do milho safra e safrinha em diferentes regiões produtoras do Brasil, encontrou menores perdas em solos argilosos, devido a sua maior capacidade de armazenamento de água, favorecendo menores períodos de estresse hídrico para a cultura. Assim como em outras culturas agrícolas, o déficit hídrico foi o maior fator de perda da produtividade das culturas, tanto na safra quanto na safrinha, havendo poucas exceções nos estados do ES, MT, RJ, SP e TO na safra e nos estados do PA, RS e SC na safrinha. Em média, a quebra de produtividade causada pela deficiência hídrica para a cultura no milho foi de 52%, sendo que as maiores perdas foram encontradas em solos arenosos e locais com déficit de precipitação. Isso evidencia que tanto para culturas florestais quanto para culturas agrícolas, a deficiência hídrica é o principal fator das perdas de produtividade.

Todos os estudos citados anteriormente são derivados de dados observados. Porém, existem diversos estudos realizados em diferentes locais no mundo que quantificaram os *yield gaps* usando diferentes modelos de simulação, os quais utilizaram dados espacializados de variáveis meteorológicas e de produtividade de diversas culturas (LICKER et al., 2010; MUELLER et al., 2012). Uma limitação deste tipo de abordagem é que a maioria dos estudos não distingue o limite biofísico entre os valores de PP e PA, levando a diferentes estimativas e, consequentemente, a diferentes magnitudes e distribuição espacial dos valores dos *yield gaps* (VAN ITTERSUM et al., 2013). Assim, grandes diferenças nas estimativas de PP e PA em estudos globais mostram que resultados de modelos genéricos precisam de avaliação local a fim de se ter estimativas mais precisas (VAN ITTERSUM et al., 2013; VAN WART et al., 2013), como as feitas neste estudo.

Além disso, a abordagem inédita das quebras de produtividade na área florestal auxilia em uma análise mais profunda de cada localidade para o estabelecimento de ações que possam minimizar os impactos das perdas de produtividade, aumentando assim a eficiência de produção dos eucaliptos.

3.4. Conclusões

Em todas as 22 localidades a deficiência hídrica foi o principal fator limitante das perdas de produtividade, correspondendo a 88% da QT, enquanto que as perdas de produtividade, decorrentes do manejo florestal sub-ótimo, corresponderam a 12% da QT. Isto evidencia a importância de ações que minimizem os impactos da deficiência hídrica na produtividade florestal da região estudada, especialmente na escolha de clones mais tolerantes ao déficit hídrico e de épocas de transplante com menores riscos climáticos, assim como a melhoria das condições do perfil do solo, aumentando a capacidade de água disponível (CAD).

Referências

- AFFHOLDER, F.; POEYDEBAT, C.; CORBEELS, M.; SCOPEL, E.; TITTONELL, P. The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modelling. **Field Crops Research**, v. 143, p. 106–118, 2013.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. **Irrigation and Drainage Paper No. 56**, FAO, n. 56, p. 300, 1998.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 50, p. 121–126, 1924.
- BATTIE-LACLAU, P.; DELGADO-ROJAS, J. S.; CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J. P.; PICCOLO, M. de C.; MOREIRA, M. Z.; GONÇALVES, J. L. de M.; ROUPSARD, O.; LACLAU, J. P. 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.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G. Eficiência agrícola da produção de soja, milho e trigo no estado do Rio Grande do Sul entre 1980 e 2008. **Ciencia Rural**, v. 42, n. 1, p. 24–30, 2012.

- BENDER, F. D. **Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade da cultura de milho e estratégias de manejo para minimização de perdas em diferentes regiões brasileiras**. 2017. 182f. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, Í.; STAPE, J. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, n. July, p. 271–283, 2017.
- DIAS, H. B. **Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil**. 2016. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306p.
- DUARTE, Y. C. N. **Modelos de simulação da cultura do milho : uso na determinação das quebras de produtividade (yield gaps) e na previsão de safra da cultura no Brasil**. 2018. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- GLOVER, J.; MCCULLOCH, J. S. G. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 84, n. 360, p. 172–175, 1958.
- GONÇALVES, J. L.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 79, n. 3, p. 169–183, 2017.
- GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A.; BEHLING, M.; ALVES, J. M.; PIZZI, G. T.; ANGELI, A. Produtividade de plantações de eucalipto manejadas nos sistemas de alto fuste e talhadia, em função de fatores edafoclimáticos. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 40, n. 103, p. 411–419, 2014.
- GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6–27, 2013.

- GONÇALVES, J. L. de M.; STAPE, J. L.; LACLAU, J. P.; SMETHURST, P.; GAVA, J. L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 45–61, 2004.
- HAKAMADA, R.; HUBBARD, R. M.; FERRAZ, S.; STAPE, J. L.; LEMOS, C. Biomass production and potential water stress increase with planting density in four highly productive clonal Eucalyptus genotypes. **Southern Forests**, v. 79, n. 3, p. 251–257, 2017.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=5930&z=t&o=29>>. Acesso em: 1 mar. 2016.
- LICKER, R.; JOHNSTON, M.; FOLEY, J. A.; BARFORD, C.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; RAMANKUTTY, N. Mind the gap: How do climate and agricultural management explain the “yield gap” of croplands around the world? **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, n. 6, p. 769–782, 2010.
- LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, p. 179–204, 2009.
- MARIN, F. R.; PANDORFI, H.; SENTELHAS, P. C.; DE CAMARGO, M. B. P.; HERNANDEZ, F. B. T. Perda de produtividade potencial da cultura do sorgo no estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 65, n. 1, p. 157–162, 2006.
- MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; UNGARO, M. R. G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 1, p. 1–6, 2000.
- MEIRELES, E. J. L.; PEREIRA, A. R.; SENTELHAS, P. C.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, F. J. P. Risco climático de quebra de produtividade da cultura do feijoeiro em Santo Antônio de Goiás, Go. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 163–171, 2003.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap: Can it be determined at national level with a simple agrometeorological model? **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 3, p. 272–284, 2017.
- MUELLER, N. D.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; RAY, D. K.; RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J. A. Closing yield gaps through nutrient and water management. **Nature**, v. 490, n. 7419, p. 254–257, 2012.

- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Condicionamento Climático da Produtividade Potencial. In: **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.
- PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society Science Australian**, v. 64, p. 114–118, 1940.
- RESENDE, M. D. V.; RESENDE JR, M. F. R.; SANSALONI, C. P.; PETROLI, C. D.; MISSIAGGIA, A. A.; AGUIAR, A. M.; ABAD, J. M.; TAKAHASHI, E. K.; ROSADO, A. M.; FARIA, D. A.; PAPPAS, G. J.; KILIAN, A.; GRATTAPAGLIA, D. Genomic selection for growth and wood quality in *Eucalyptus*: Capturing the missing heritability and accelerating breeding for complex traits in forest trees. **New Phytologist**, v. 194, n. 1, p. 116–128, 2012.
- ROLIM, G. de S.; SENTELHAS, P. C.; UNGARO, M. R. G. Análise do risco climático para a cultura do girassol, em algumas localidades de São Paulo e do Paraná, usando os modelos DSSAT/OILCROP-SUN e FAO. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 1, p. 91–102, 2001.
- RYAN, M. G.; STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C. Factors controlling Eucalyptus productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1695–1703, 2010.
- SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, a C. The soybean yield gap in Brazil – magnitude , causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agriculture Science**, v. 65, n. 7, p. 1–18, 2015.
- SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; MONTEIRO, L. A.; DUARTE, Y. C. N.; VISSER, F. de A. Yield gap: Conceitos, definições e exemplos. **Informações Agronômicas**, n. 155, p. 9–12, 2016.
- SENTELHAS, P. C.; ELLI, E. F.; FREITAS, C. H. de. Yield Gap: Conceitos e aplicações no setor florestal. **Revista Opiniões**, p. 28–29, 2017. Disponível em: <<http://florestal.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/10-yield-gap-conceitos-e-aplicacoes-no-setor-flore/>>.
- 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, n. 3–4, p. 920–930, 2008.

- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M. de A.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684–1694, 2010.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. 1. ed. Centerton: Laboratory of Climatology, 1955.
- VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013.
- VAN ITTERSUM, M. K.; RABBINGE, R. Concept of production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combination. **Field Crops Research**, v. 52, p. 197–208, 1997.
- VAN WART, J.; VAN BUSSEL, L. G. J.; WOLF, J.; LICKER, R.; GRASSINI, P.; NELSON, A.; BOOGAARD, H.; GERBER, J.; MUELLER, N. D.; CLAESSENS, L.; VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. **Field Crops Research**, v. 143, p. 44–55, 2013.
- VISSES, F. de A. **Estimativa da produtividade e da perda do potencial produtivo (yield gap) da cultura da mandioca (*Manihot Esculenta* Crantz) nas principais regiões produtoras do Brasil**. 2016. 36f. Trabalho de Conclusão de Curso (Concentração em Engenharia de Biosistemas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP, Piracicaba.
- XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, p. 1–6, 2015. Disponível em: <<https://utexas.app.box.com/v/xavier-et-al-ijoc-data>>.

4. IMPACTOS DO FENÔMENO EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL NA VARIABILIDADE CLIMÁTICA E SUA INFLUÊNCIA NA PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO NO BRASIL

Resumo

O El Niño Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno que afeta diretamente a temperatura do ar e modifica os regimes pluviométricos das regiões, podendo impactar a produtividade das florestas plantadas, como, por exemplo, as de eucalipto, fazendo-se necessário um melhor entendimento sobre as reais consequências destes eventos nas mesmas. Assim, o objetivo deste estudo foi identificar a influência dos eventos El Niño, La Niña e Neutros na produtividade do eucalipto em 12 regiões produtoras do Brasil e em dois tipos de clone de eucalipto A1 (*E. urophylla* x *sp*) e C3 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*). Para a estimativa da produtividade do eucalipto foi utilizado o Modelo da Zona Agroecológica (MZA) devidamente adaptado, calibrado e testado para a cultura do eucalipto. Foram utilizados dados meteorológicos diários de temperatura do ar, precipitação pluviométrica, umidade relativa do ar, velocidade do vento e irradiação solar global no período 1980 a 2016. Para avaliar o crescimento do eucalipto foi considerado o Incremento Corrente Anual (ICA) no período de máximo crescimento, sendo no 3º ano de seu ciclo. Foram escolhidos todos os eventos de ENOS concentrados no período de 1983 a 2016 e suas respectivas classificações de intensidade. As produtividades e as perdas de produtividade do eucalipto durante a atuação de eventos de ENOS mostraram-se amplamente variáveis tanto espacialmente quanto temporalmente, como consequência dos diferentes regimes térmicos e hídricos das regiões produtoras. Em geral, não houve uma identificação significativa da influência do ENOS no incremento corrente anual potencial (ICA_{pp}). Entretanto, houve um ligeiro aumento de ICA_{PA} em algumas localidades das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste em anos neutros, em anos de El Niño este ligeiro aumento foi observado em localidades da região Sul, e para a região Sudeste, não foi possível estabelecer uma relação de aumento e/ou diminuição de ICA_{PA}. As perdas de incremento (Q_{ICA}) foram diferentes também entre os clones A1 e C3, onde em geral, para o clone A1, as perdas de produtividade foram maiores em anos de El Niño para as localidades de ARC, NQL, INP, UBS, MDR e PEX, seguida por anos de La Niña para as localidades de ARP, SGB, BOR, GNS e CPS e neutros. Já para o clone C3 as perdas foram maiores em anos de La Niña para as localidades de ARP, SGB, BOR, GNS, CPS, NQL, INP, UBS e PEX, seguida por anos de El Niño nas localidades de ARC e MDR e neutros.

Palavras-chave: ENOS; Quebras de produtividade; Modelos de simulação; ICA

Abstract

El Niño Southern Oscillation (ENSO) is a phenomenon which affects air temperature and modifies the rainfall regimes in the regions and may impact the yield of planted forests, such as eucalyptus ones, making necessary a better understanding of the real consequences of these events on them. Thus, the aim of this study was to identify the influence of El Niño, La Niña and Neutral years on eucalyptus yield in 12 Brazilian producing regions and in two eucalyptus' clones A1 (*E. urophylla* x *sp*) and C3 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*). To estimate eucalyptus' yield the Agroecological Zone Model (AEZ-FAO) adapted, calibrated and evaluated was used. Daily air temperature, rainfall, relative humidity, wind speed and incoming solar irradiation data were used for the period from 1980 to 2016. In order to evaluate the eucalyptus growth, the Current Annual Increment (CAI) in the period of maximum growth, in the 3rd year of the cycle, was used. The ENSO events from 1983 to

2016 and their intensity were assessed. The eucalyptus yield and yield gap during the ENSO events were widely variable both spatially and temporally as a consequence of the different thermal and water regimes of the producing regions. In general, there was no significant influence of ENSO events on the potential current annual increment (CAI_{YP}). However, there was a slight increase of the attainable current annual increment (CAI_{YA}) in some areas in the Central-West, North and Northeast regions in neutral years. In El Niño years this slight increase was observed in the South region locations, and to the Southeast region, it was not possible to establish a relation of increase and/or decrease of CAI_{YA} . The CAI yield gaps (YG_{CAI}) were also different between the A1 and C3 clones. In general, for A1 clone, the YG_{CAI} were higher in El Niño years for ARC, NQL, INP, UBS, MDR and PEX locations, followed by La Niña years for ARP, SGB, BOR, GNS and CPS and neutral years. However, for C3 clone, the YG_{CAI} were higher in La Niña years for ARP, SGB, BOR, GNS, CPS, NQL, INP, UBS and PEX, followed by El Niño years in ARC and MDR and neutral years.

Keywords: ENSO; Yield gaps; Simulation models; CAI

4.1. Introdução

O El Niño Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno resultante do forte acoplamento oceano-atmosfera e é caracterizado como um aumento (El Niño) ou resfriamento (La Niña) significativo na temperatura da superfície do mar (TSM) na região do Pacífico Equatorial, que ocorre em intervalos irregulares, variando entre dois e sete anos (GRIMM, 2004).

O termo El Niño (EN) representa o componente oceânico, enquanto a Oscilação Sul (OS) representa o componente atmosférico deste fenômeno (BERLATO; FONTANA, 2003). O componente atmosférico explica a correlação inversa que existe entre a pressão atmosférica nos extremos leste e oeste do Oceano Pacífico, também chamada de ‘gangorra barométrica’, que estabelece que, quando a pressão é alta no lado leste, normalmente será baixa no lado oeste, e vice-versa. Já o componente oceânico, refere-se às variações de temperatura da superfície do mar ao longo da região equatorial do Oceano Pacífico (BERLATO; FONTANA, 2003).

Em geral, o efeito que o ENOS causa na circulação atmosférica é bastante significativo, provocando alterações tanto na circulação global quanto na regional e resultando em anomalias climáticas em várias partes do globo, que afeta diretamente a temperatura do ar e modifica o regime pluviométrico de diversas regiões do Brasil e do mundo (ALEXANDER et al., 2002; BERLATO; FONTANA, 2003)

O efeito do ENOS no clima do Brasil varia consideravelmente entre as regiões (Figura 4.1). Durante eventos de El Niño, há uma redução nos padrões de precipitação nas regiões Norte e Nordeste, enquanto que na região Sul há um aumento nos volumes de chuva (Figura 4.1A e 4.1B). Nos anos de eventos de La Niña, em contrapartida, este padrão se inverte, aumentando as chuvas nas regiões Norte e Nordeste e havendo uma redução de seus

volumes na região Sul do país além de uma ligeira diminuição nos valores de temperatura nas regiões Sudeste e Sul (Figura 4.1C e 4.1D) (BERLATO; FONTANA, 2003; GRIMM, 2004; CIRINO et al., 2015). Nas regiões de transição como o Sudeste e o Centro-Oeste, a resposta do ENOS não é tão linear e bem definida como nas demais regiões, pois as anomalias tanto de chuva como de temperatura podem se deslocar para norte ou para sul de um evento para outro, podendo, assim, alterar o sinal, em relação aos eventos anteriores (GRIMM, 2003, 2004; MINUZZI et al., 2010; MARCUZZO; ROMERO, 2013).

A variabilidade climática causada pelo ENOS pode também impactar a produtividade das culturas agrícolas e das florestas plantadas. Diversos estudos têm sido realizados para culturas agrícolas em várias localidades do mundo (PODESTÁ et al., 1999; ANDRÉS FERREYRA et al., 2001; BERLATO; FONTANA, 2001; CUNHA; DALMAGO; ESTEFANEL, 2001; IIZUMI et al., 2014; CIRINO et al., 2015; ANDERSON et al., 2017), buscando quantificar o impacto do ENOS na produtividade das culturas. Porém, os estudos desses impactos em florestas, como por exemplo em florestas de eucalipto, são praticamente inexistentes, fazendo-se necessário um melhor entendimento sobre as reais consequências destes eventos no crescimento dessas florestas.

Das espécies florestais mais plantadas no Brasil destaca-se o gênero *Eucalyptus*, sendo este manejado intensivamente, principalmente para a obtenção dos produtos como polpa celulósica, papel, madeira para serraria e geração de energia, representando aproximadamente 75% da área de florestas plantadas no país (ABRAF, 2013; IBGE, 2017).

Figura 4.1. Impactos climáticos do El Niño Oscilação Sul (ENOS) em sua fase positiva (El Niño, A e B) e negativa (La Niña, C e D), no período de dezembro, janeiro e fevereiro (A e C) e junho, julho e agosto (B e D). Adaptado de CPTEC/INPE (2012).

Com base nisso, os modelos de simulação do crescimento e da produtividade permitem a estimativa da dinâmica natural dos povoamentos florestais, sob os efeitos dos fatores físicos e bióticos distintos ao longo do seu ciclo, auxiliando no processo de avaliação dos plantios florestais em novas fronteiras (MARTINS, 2011), como por exemplo no estudo do impacto do ENOS na produtividade de eucaliptos.

Dentre os modelos de culturas, tem-se o Modelo da Zona Agroecológica também conhecido como MZA-FAO que foi descrito por Doorenbos e Kassam (1994) e objetiva a estimativa da produtividade potencial (PP) e atingível (PA) de uma dada cultura. A PP pode ser entendida como sendo aquela obtida por uma espécie/variedade altamente produtiva e bem adaptada ao ambiente, sem restrições hídricas, nutricionais e fitossanitárias, enquanto a PA

leva em conta o efeito do déficit hídrico no crescimento da cultura ao longo de seu ciclo (DOORENBOS; KASSAM, 1994; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

A grande variabilidade espacial e temporal das condições climáticas em anos de atuação do ENOS no Brasil faz com que seja importante um melhor conhecimento e quantificação dos impactos dos padrões de chuva e temperatura no crescimento e na produtividade das florestas, como forma de auxílio no planejamento e manejo dos cultivos florestais. Sendo assim, a hipótese deste estudo é que a atuação dos eventos do ENOS pode impactar a produtividade do eucalipto no Brasil e este impacto deve variar entre as distintas regiões do país. Com base nisso, o objetivo deste estudo foi identificar a influência de eventos de El Niño, La Niña e Neutros na produtividade das florestas de eucaliptos em diferentes localidades produtoras do Brasil.

4.2. Material e Métodos

4.2.1.1. Local de estudo

O presente estudo considerou 12 localidades brasileiras nas quais a produção de eucalipto é expressiva (Tabela 4.1) e onde havia disponibilidade de séries históricas de dados meteorológicos. Assim, foram utilizados dados meteorológicos diários de temperatura do ar (mínima – T_{min} e máxima - T_{max}), precipitação pluviométrica (P), insolação (n), umidade relativa média do ar (UR) e velocidade média do vento (U₂) no período de 1980 a 2016, obtidos a partir da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A irradiação solar global (Q_g) foi estimada por meio do modelo proposto por Angström (1924) e, posteriormente, modificado por Prescott (1940), tendo como variáveis independentes n, fotoperíodo (N) e a irradiação solar extraterrestre (Q_o). Os dados faltantes nessas séries foram preenchidos com dados em ponto de grade com resolução espacial de 0,25° x 0,25°, da base de dados apresentada por Xavier, King e Scanlon (2015).

Tabela 4.1. Identificação (ID), sigla das localidades empregadas neste estudo, assim como suas coordenadas geográficas, altitude, textura do solo e capacidade de água disponível do solo para um perfil de 3 m.

ID	Sigla	Localidade	Estado	Lat	Lon	Alt m	CAD (3m)
				Graus (°)			mm
1	SGB	São Gabriel	RS	-30,34	-54,32	102	272
2	OTC	Otacílio Costa	SC	-27,53	-50,10	870	335
3	ARP	Arapoti	PR	-24,21	-49,97	770	410
4	BOR	Borebi	SP	-22,73	-49,00	656	194
5	ARC	Aracruz	ES	-19,76	-40,13	36	297
6	CPS	Chapadão do Sul	MS	-18,71	-52,59	783	254
7	GNS	Guanhães	MG	-18,58	-42,93	873	357
8	NQL	Niquelândia	GO	-14,34	-48,73	545	271
9	PEX	Peixe	TO	-12,17	-48,50	255	293
10	INP	Inhambupe	BA	-11,86	-38,37	218	136
11	UBS	Urbano Santos	MA	-3,44	-43,07	81	361
12	MDR	Monte Dourado	PA	-0,85	-52,65	50	353

As localidades escolhidas possuem climas, texturas de solo e capacidade de água disponível (CAD) bastante diversificados (Figura 4.2). Segundo a classificação climática de Köppen, os climas das localidades analisadas são: clima tropical (Am – clima tropical de monção, As – clima tropical úmido com estação seca de verão e Aw – clima tropical úmido com estação seca de inverno); clima subtropical sem estação seca (Cfa – clima subtropical úmido com verão quente e Cfb – clima subtropical úmido com verão moderadamente quente); e subtropical com estação seca de inverno (Cwa – clima subtropical úmido com verão quente) (ALVARES et al., 2013).

Figura 4.2. Classificação climática de Köppen das localidades utilizadas para a avaliação dos impactos dos eventos do El Niño Oscilação Sul (ENOS) na produtividade do eucalipto no Brasil. Adaptado de Alvares et al. (2013).

4.2.2. Estimação da produtividade potencial (PP) e atingível (PA)

A produtividade potencial (PP) foi estimada segundo a Equação 1, por meio do Modelo da Zona Agroecológica – FAO (MZA-FAO) adaptado, seguindo os parâmetros obtidos para os clones A1 (*E. urophylla* x *sp*) e C3 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) e a produtividade potencial acumulada (PPac) pelo somatório da PP diária (Equação 2):

$$PP_i = [Fb_i \times C_{IAF_i} \times C_{R_i} \times C_{C_i}] \cdot \prod_{i=1}^{ND} (f_{frost})_i \quad [kg \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}] \quad (1)$$

$$PPac = \sum_{i=1}^{ND} \left[\left(\frac{PP}{1000} \right) \cdot f_{frost} \right]_i \begin{pmatrix} \text{se } i \leq 2\text{anos}; f_{frost} = f_{frost} \\ \text{se } i > 2\text{anos}; f_{frost} = 1 \end{pmatrix} \quad [m^3 \cdot ha^{-1}] \quad (2)$$

em que: Fb é a fotossíntese bruta, representando a produtividade bruta de matéria seca de uma cultura hipotética padrão ($kg \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}$); C_{IAF} é a correção para o efeito do índice de área foliar da cultura; C_R é a correção para a taxa de manutenção da cultura (respiração); C_C é a correção para o índice de colheita ($C_c = 0,72$); i é o i -ésimo dia do ciclo; ND é o número de dias de duração do ciclo do eucalipto até idade de colheita ou corte; f_{frost} a função de penalização por geada (Tabela 4.2); e ρ_m a densidade da madeira ($t \cdot m^{-3}$), ajustada usando um modelo não linear proposto por Sands e Landsberg (2002) e dados observados do período de máximo crescimento para os clones ($\rho_{max} = 0,43$).

Tabela 4.2. Função de penalização por ocorrência de geada (f_{frost}) para a estimativa da produtividade de *E. urophylla* x *sp* e *E. grandis* x *E. camaldulensis* no Brasil.

Temperatura Mínima Diária (T_{min} , °C)	$A1(f_{frost})$	$C3(f_{frost})$
$1 \leq T_{min} \leq 2$	0,99	1,00*
$0 \leq T_{min} \leq 1$	0,99	1,00
$-1 \leq T_{min} \leq 0$	0,98	0,99
$-2 \leq T_{min} \leq -1$	0,98	0,99
$-3 \leq T_{min} \leq -2$	0,96	0,96
$-4 \leq T_{min} \leq -3$	0,95	0,95
$T_{min} < -4$	0,93	0,93

*Valores próximos a 1 indicam maior tolerância do clone quanto a ocorrência de geada durante seu ciclo de crescimento.

A produtividade atingível (PA, Equação 3 e 4) é dada pelo efeito de penalização da PP pela deficiência hídrica e ponderado por um fator de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (ky , Equação 6) em cada fase de seu crescimento e pela função de mortalidade por deficiência hídrica intensa (f_{wd} , Tabela 4.3). A produtividade atingível acumulada (PAac) foi obtida por meio do somatório dos valores diários de PA (Equação 5):

$$PA_i = [1 - ky_i \cdot (1 - ETr_i / ETc_i)] \cdot PP_i \quad [kg \cdot ha^{-1}] \quad (3)$$

$$PA_{adj_i}(m) = PA_i(m) \cdot \prod_{m=1}^M (f_{wd})_m \quad [kg \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}] \quad 1 \leq m \leq M \quad (4)$$

$$PAac = \sum_{i=1}^{ND} \left[\left(\frac{PA}{1000} \right) \cdot f_{frost} \right]_i \left(\begin{array}{l} \text{se } i \leq 2\text{anos}; f_{frost} = f_{frost} \\ \text{se } i > 2\text{anos}; f_{frost} = 1 \end{array} \right) \left[m^3 \cdot ha^{-1} \right] \quad (5)$$

em que: M é o número de meses; ND o número de dias que o eucalipto atinge a idade de colheita ou corte; fwd a função de mortalidade por deficiência hídrica e i é o i -ésimo dia do ciclo.

Tabela 4.3. Função de penalização por deficiência hídrica intensa (f_{wd}) para a estimação da produtividade de *E. urophylla* x *sp* e *E. grandis* x *E. camaldulensis* no Brasil.

Déficit Hídrico Acumulado Mensal (DEFac _{men} , mm)	A1(f_{wd})	C3(f_{wd})
$0 \leq \text{DEFac}_{men} \leq 100$	1,00*	1,00
$101 \leq \text{DEFac}_{men} \leq 150$	0,98	0,90
$151 \leq \text{DEFac}_{men} \leq 200$	0,95	0,80
$201 \leq \text{DEFac}_{men} \leq 250$	0,90	0,75
$251 \leq \text{DEFac}_{men} \leq 300$	0,85	0,70
$\text{DEFac}_{men} > 300$	0,75	0,65

*Valores próximos a 1 indicam maior tolerância do clone à deficiência hídrica intensa durante seu ciclo de crescimento.

O ky diário é dado por:

$$ky_i(m) = \frac{(ky_{f+1} - ky_f)}{(M_{f+1} - M_f)} + ky_{i-1} \quad M_f \leq m \leq M_{f+1} \quad (6)$$

em que: ky_i é o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico diário; m o mês do ciclo, variando de 1 a M ; ky_{f+1} e ky_f são os valores de ky calibrados para a fase subsequente e fase atual dos clones A1 e C3 (Tabela 4.4) e M_{f+1} e M_f os meses de cada fase corresponde aos valores de ky calibrados.

Tabela 4.4. Coeficientes de sensibilidade ao déficit hídrico (ky) para a estimação da produtividade de *E. urophylla* x *sp* e *E. grandis* x *E. camaldulensis* no Brasil.

Fases (f)	Meses (M)	A1	C3
1	1	1,3	1,5
2	10	1,1	1,3
3	30	1,4	1,8
4	60	1,1	1,5
5	84	0,8	1,0

A penalização da PP pelo déficit hídrico é dada pelo déficit relativo de evapotranspiração ($1 - E_{Tr}/E_{Tc}$), em que E_{Tr} é a evapotranspiração real e E_{Tc} a evapotranspiração da cultura. A E_{Tc} é resultado do produto entre a evapotranspiração de

referência (ET_o) e o coeficiente de cultura (k_c), que variou de 0,5 no início do ciclo, atingindo o valor máximo (1,2) por volta dos 30 meses e decrescendo gradativamente até 0,93 aos 48 meses. A ET_o foi estimada pelo método de Penman-Monteith, de acordo com a parametrização de Allen et al. (1998). A ET_r foi estimada pelo balanço hídrico climatológico sequencial de Thornthwaite e Mather (1955) para a cultura do eucalipto iniciado sempre um ano antes do início do ciclo da cultura a fim de que houvesse uma estabilização do balanço. As capacidades de água disponível máxima (CAD) de cada localidade foram obtidas do projeto TECHS (Tabela 4.1, BINKLEY et al. (2017)). Ao longo do ciclo os valores de CAD variaram de acordo com o crescimento da floresta.

O Modelo MZA-FAO foi adaptado, calibrado e avaliado em diferentes regiões produtoras com dados de inventários disponibilizados por 26 empresas florestais parceiras do Programa Cooperativo sobre Tolerância de Eucalyptus Clonais aos Estresses Hídrico e Térmico, conhecido como projeto TECHS, no período de 2011-2016 (BINKLEY et al., 2017)

Os índices estatísticos das fases de calibração e avaliação do modelo são apresentados na Figura 4.3. Na fase de calibração (Figura 4.3A) foram encontrados valores de REQ_M de 38,61 m³ ha⁻¹, com alta acurácia, por meio do índice de concordância d (WILLMOTT, 1981) chegando a 0,93 e boa precisão das estimativas de volume total (R² = 0,82). A eficiência do modelo (EM) foi igual a 0,75, considerada muito boa (SANTHI et al., 2001). O índice de confiança (c, CAMARGO e SENTELHAS, 1997) mostrou que as estimativas do volume total do eucalipto são muito boas (c = 0,84). Já na fase de avaliação do modelo (Figura 4.3B), o desempenho geral foi ainda melhor, classificado como ótimo (c = 0,87, R² = 0,86, EM = 0,74, REQ_M = 41,67 m³ ha⁻¹ e d = 0,93).

Figura 4.3. Relação entre o volume de madeira observado e estimado pelo modelo MZA-FAO para a cultura do eucalipto nas fases de calibração (A) e avaliação (B), e seus respectivos índices estatísticos e erros, considerando-se diferentes regiões brasileiras. n = número de amostras.

4.2.3. Avaliação do crescimento do eucalipto em eventos de ENOS

Para avaliar o crescimento do eucalipto, foi considerado seu período de máximo crescimento (3º ano) (REZENDE; FERRAZ, 1986; PAULA et al., 2013; MENDONÇA et al., 2017), que pode ser indicado pelo maior Incremento Corrente Anual (ICA) ao longo do seu ciclo médio (sete anos) e datas de plantio entre 1981 e 2013, sempre iniciadas no 15º dia do mês de janeiro de cada ano:

$$ICA_{PP_t} = PP_t - PP_{t-1} \quad [m^3 \cdot ha^{-1}] \quad (7)$$

$$ICA_{PA_t} = PA_t - PA_{t-1} \quad [m^3 \cdot ha^{-1}] \quad (8)$$

em que PP é a produtividade potencial em volume no ano t ($m^3 \cdot ha^{-1}$) e PA a produtividade atingível em volume no ano t ($m^3 \cdot ha^{-1}$).

A quebra de incremento corrente por deficiência hídrica (Q_{ICA} , *yield gap*) foi calculada pela Equação 9.

$$Q_{ICA} = ICA_{PP_3} - ICA_{PA_3} \quad [m^3 \cdot ha^{-1}] \quad (9)$$

em que ICA_{PP_3} é o incremento corrente anual potencial no terceiro ano do ciclo ($m^3 \cdot ha^{-1}$) e ICA_{PA_3} o incremento corrente anual atingível no terceiro ano do ciclo ($m^3 \cdot ha^{-1}$).

Foram escolhidos todos os eventos de ENOS concentrados no período de 1983 a 2016 (Tabela 4.5) e classificados de acordo com o Índice Oceânico Niño (ION), do inglês Oceanic Niño Index (ONI), considerando seu maior período de influência, este de 1° de junho do ano n 31 de julho do ano seguinte ($n+1$). O índice ION é um parâmetro que identifica as anomalias da temperatura da superfície do Oceano Pacífico, por meio da média móvel de três meses de TSM. Quando o índice for maior que $+0,5^{\circ}\text{C}$ e menor que $-0,5^{\circ}\text{C}$, por no mínimo cinco trimestres móveis consecutivos, o período é caracterizado, respectivamente como El Niño e La Niña (KOUSKY; HIGGINS, 2007). Caso o índice permaneça entre $+0,5^{\circ}\text{C}$ e $-0,5^{\circ}\text{C}$, o período é caracterizado como Neutro. A Tabela 4.5 apresenta a classificação dos anos de acordo com as anomalias da TSM.

Para identificar a variabilidade dos dados de ICA_{PP} , ICA_{PA} e Q_{ICA} foi utilizada a Variação Interquartil (Inter Quartile Range, IQR), a qual é dada pela diferença entre o terceiro quartil (Q3) e o primeiro quartil (Q1) (GONZÁLEZ-ROUCO et al., 2001; WILKS, 2006; REBOITA et al., 2016; GARCIA et al., 2018). Assim, foram calculadas as porcentagens de anos de El Niño, La Niña e Neutros, com valores de ICA_{PP} , ICA_{PA} e Q_{ICA} acima, abaixo e dentro do intervalo IQR.

Tabela 4.5. Classificação dos anos de El Niño (EN), La Niña (LN) e Neutros (NE) no período de 1983 a 2017 de acordo com as anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM)*. Fonte: GOLDEN GATE WEATHER SERVICES (2018)

Eventos	Classificação	Período	Evento	Classificação	Período
LN	Fraco	1983/84	LN	Fraco	2000/01
LN	Fraco	1984/85	NE	--	2001/02
NE	--	1985/86	EN	Moderado	2002/03
EN	Moderado	1986/87	NE	--	2003/04
EN	Forte	1987/88	EN	Fraco	2004/05
LN	Forte	1988/89	LN	Fraco	2005/06
NE	--	1989/90	EN	Fraco	2006/07
NE	--	1990/91	LN	Forte	2007/08
EN	Forte	1991/92	LN	Fraco	2008/09
NE	--	1992/93	EN	Moderado	2009/10
NE	--	1993/94	LN	Forte	2010/11
EN	Moderado	1994/95	LN	Moderado	2011/12
LN	Moderado	1995/96	NE	--	2012/13
NE	--	1996/97	NE	--	2013/14
EN	Muito Forte	1997/98	EN	Fraco	2014/15
LN	Forte	1998/99	EN	Muito Forte	2015/16
LN	Forte	1999/00	LN	Fraco	2016/17

* Os eventos são classificados em Fracos (anomalia de TSM entre 0,5 e 0,9), Moderado (anomalia de TSM entre 1,0 e 1,4), Forte (anomalia de TSM entre 1,5 e 1,9) e Muito Forte (anomalia de TSM maior que 2,0).

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Efeito do ENOS no clima

A variação temporal e espacial das variáveis meteorológicas afeta diretamente o crescimento e desenvolvimento do eucalipto desde a fase de muda (MARTINS; STRECK, 2007; ABREU et al., 2015; FREITAS; MARTINS; ABREU, 2017; OLIVEIRA et al., 2017) até o estágio mais avançado do ciclo (STAPE et al., 2010; BINKLEY et al., 2017; MENDONÇA et al., 2017), afetando o déficit de pressão de vapor e, consequentemente, o mecanismo de abertura e fechamento dos estômatos, a absorção de CO₂ e a fotossíntese, a distribuição de fotoassimilados, a respiração de manutenção e, finalmente, a produção de biomassa oriunda da fotossíntese líquida (RIBEIRO et al., 2009; TAIZ; ZEIGER, 2013).

Para demonstrar o efeito do ENOS no clima e, consequentemente, na produtividade do eucalipto, foram escolhidas 12 localidades que possuem condições edafoclimáticas distintas (Tabela 4.1) durante o período de maior atuação deste fenômeno no Brasil (1º junho do ano n a 31 de julho do ano $n+1$) para a temperatura do ar, a precipitação pluviométrica e a irradiação solar global.

As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam a variabilidade da temperatura média (Tmed), mínima (Tmin) e máxima (Tmax) mensais, respectivamente. Valores de mediana maiores que a média indicam que mais de 50% dos dados estão acima da média, enquanto que valores de mediana menores que a média indicam maior porcentagem dos dados abaixo da média, ou seja, valores de temperaturas mais amenos.

As temperaturas sofreram alterações em decorrência dos eventos do ENOS. Durante anos de El Niño (EN), os valores de Tmed oscilaram entre 10,5°C e 26,5°C para a localidade de São Gabriel (SGB), 9,9°C e 24,1°C para Otacílio Costa (OTC), 16,6°C e 25,3°C para Guanhães (GNS), 18,9°C e 29,2°C para Niquelândia (NQL), 21,2°C e 28,7°C para Inhambupe (INP) e 26,2° e 29,4°C para a localidade de Monte Dourado (MDR) no PA. Já em anos de La Niña (LN), os valores ficaram entre 10,5°C e 27,9°C para SGB, 9,4°C e 25,8°C para OTC, 16,6°C e 25,3°C para GNS, 18,9°C e 28,2°C para NQL, 20,9°C e 29,0°C para INP e 25,7°C e 29,4°C para MDR. Em anos classificados como neutros (NE), os valores de Tmed variaram de 11,0°C a 27,7°C para SGB, 10,0°C a 24,1°C para OTC, 17,0 a 24,7°C para GNS, 19,7°C a 27,9°C para NQL, 20,9°C a 28,6°C para INP e 25,6°C a 29,4°C para MDR.

Além disso, a amplitude média de temperatura média também variou entre os eventos de ENOS (Figura 4.4), sendo maior em anos de La Niña para as localidades do Sul e Nordeste (17,4°C, 16,5°C e 8,1°C para SGB, OTC e INP, respectivamente), em anos de El

Niño para as localidades do Sudeste e Centro-Oeste (8,7°C e 10,3°C para GNS e NQL, respectivamente) e ligeiramente maior em anos neutros para Monte Dourado, localizado na região Norte do país. Como esperado, com exceção das localidades GNS e NQL, a amplitude de temperatura foi maior em localidades de maior latitude, como por exemplo São Gabriel, RS (A, Lat = 30,34°S) e diminuiu em direção às localidades de latitudes mais baixas, como em Monte Dourado, PA (F, Lat = 0,85°S).

Em geral, a variação da amplitude da temperatura mínima mensal (T_{min}) seguiu a mesma tendência da T_{med} (Figura 4.5), com maior amplitude para a localidade SGB em anos de EN e NE, esta de 15,7°C e 15,6°C, respectivamente, enquanto que em anos de LN a maior amplitude de T_{min} foi registrada na localidade de OTC, sendo de 18,2°C. Já os menores valores de amplitude de T_{min} mensal foram para a localidade de MDR, variando entre 2,5°C para anos de EN e 3,0°C para anos de LN. Com exceção de NQL (Figura 4.5D), todas as demais localidades apresentaram valores de T_{min} em torno da média do período (1983-2015), enquanto que em NQL, a maior porcentagem dos dados até o ano de 2000 concentraram-se abaixo da média e a partir de 2001, essa porcentagem de dados de T_{min} ficou acima da média do período analisado.

Os valores máximos de T_{min} foram encontrados em anos de LN para as localidades de SGB (21,8°C), OTC (21,3°C) e MDR (24,7°C), de EN para GNS e NQL, com valores de 19,5°C e 22,4°C, respectivamente, e para INP, o maior valor de temperatura mínima foi registrado em anos neutros, com T_{min} igual a 23,8°C. Com exceção de INP, todas as demais localidades apresentaram menores valores de T_{min} em anos de La Niña, com menor valor em OTC de 3,2°C e maior de 21,7°C em MDR, enquanto que o menor valor de T_{min} para a localidade de INP foi em anos de El Niño.

Mesma tendência foi encontrada para os valores máximos mensais de temperatura (T_{max} , Figura 4.6) com máximos em anos de EN para as localidades de NQL, GO (T_{max} = 35,9°C) e INP, BA (T_{max} = 35,2°C); em anos de LN para SGB, RS (T_{max} = 35,5°C), OTC, SC (T_{max} = 30,8°C), GNS, MG (T_{max} = 32,1°C) e MDR, PA (T_{max} = 34,5°C). Percebe-se também que devido à maior amplitude das localidades de maior latitude, o maior valor de temperatura máxima foi registrado em SGB. Os valores mínimos de T_{max} , com exceção de GNS, foram registrados em anos de La Niña, variando de 15,0°C para SGB e OTC, 24,7°C para INP, 25,5°C para NQL e 29,4°C para MDR, enquanto que para GNS o menor valor de T_{max} foi ocorrido em anos de El Niño, com T_{max} de 22,1°C. Esse padrão, com ligeiras diminuições nas temperaturas das regiões Sul e Sudeste em anos de La Niña foi também encontrado por Berlato e Fontana (2003), Grimm (2004) e Cirino et al. (2015). Porém, a

exceção de GNS ter registrado menores temperaturas em anos de El Niño, deve-se também ao fato de que a resposta do ENOS na região sudeste não é tão bem definida (MINUZZI et al., 2010).

Para MDR, a amplitude de temperatura máxima mensal foi maior que a amplitude de Tmin e Tmed (Figura 4.6F) e a tendência da maior porcentagem dos dados até o ano de 2000 concentrarem abaixo da média e a partir de 2001, a porcentagem ficar acima da média também foi encontrada para a localidade de NQL para a variável Tmax, além de apresentar a maior quantidade de valores extremos (*outliers*) que as demais localidades (Figura 4.6D).

Figura 4.4. Variabilidade anual e interanual da temperatura média mensal (T_{med} , °C) em seis localidades do Brasil: São Gabriel, RS (A); Otacílio Costa, SC (B); Guanhães, MG (C); Niquelândia, GO (D); Inhambupe, BA (E) e Monte Dourado, PA (F), considerando-se o ciclo de avaliação de 1º junho de um ano a 31 de julho do ano seguinte. Linha tracejada representa a média climatológica do período.

Figura 4.5. Variabilidade anual e interanual da temperatura mínima mensal (T_{min} , °C) em seis localidades do Brasil: São Gabriel, RS (A); Otacílio Costa, SC (B); Guanhões, MG (C); Niquelândia, GO (D); Inhambuê, BA (E) e Monte Dourado, PA (F), considerando-se o ciclo de avaliação de 1º junho de um ano a 31 de julho do ano seguinte. Linha tracejada representa a média climatológica do período.

Figura 4.6. Variabilidade anual e interanual da temperatura máxima mensal (T_{max} , °C) em seis localidades do Brasil: São Gabriel, RS (A); Otacílio Costa, SC (B); Guanhães, MG (C); Niquelândia, GO (D); Inhambuê, BA (E) e Monte Dourado, PA (F), considerando-se o ciclo de avaliação de 1º junho de um ano a 31 de julho do ano seguinte. Linha tracejada representa a média climatológica do período.

A Figura 4.7 apresenta a variabilidade da precipitação pluviométrica acumulada mensal (P). A mesma interpretação entre mediana e média foi realizada. Diferentemente dos padrões de temperatura do ar, a precipitação variou consideravelmente, tanto em escala temporal, quanto em escala espacial (GRIMM, 2003).

Em geral, espera-se que durante eventos de El Niño, haja uma redução nos padrões de precipitação nas regiões Norte e Nordeste, enquanto que na região Sul haja um aumento nos volumes de chuva, com o oposto ocorrendo em eventos de La Niña, com diminuição da precipitação também na região Sudeste (BERLATO; FONTANA, 2003; GRIMM, 2004; CIRINO et al., 2015). Para a região sul (localidades SGB e OTC), os valores de P atingiram, respectivamente, acumulados mensais de 480,7 e 361 mm em anos de EN, de 385,0 e 702,5 mm em anos de LN e de 347,4 e 361,8 mm em anos Neutros. O maior acumulado de P para SGB foi observado em 2009 (Figura 4.7A), sendo este ano classificado como EN, porém para OTC, a maior precipitação acumulada mensal observada foi em 1983 (Figura 4.7B), ano de LN. Entretanto, por meio dos limiares (LS – limite superior e LI – limite inferior) de consideração de dados errôneos utilizados por Garcia et al. (2018) para a variação precipitação ($LS = P98 + 3IQR$; em que P98 é o percentil 98º e IQR a variação interquartil), o valor máximo de acumulado de P para a localidade de OTC pode ser considerado um *outlier* e caso não haja registro de valores desta magnitude em estações meteorológicas vizinhas, este poderá ser retirado da análise. Calculando o LS para as demais localidades, não foi encontrado nenhum valor acima do limite superior.

Para as localidades do Nordeste e Norte, INP (Figura 4.7E) e MDR (Figura 4.7F), os acumulados mensais máximos foram, respectivamente, de 283,6 mm e 534,8 mm em anos de EN, de 444,4 mm e 463,2 mm em anos de LN, e de 359,1 mm e 471,3 mm em anos neutros, sendo os máximos valores de P observados nos anos de 1988 (LN) e 1987 (EN).

Figura 4.7. Variabilidade anual e interanual da precipitação pluviométrica acumulada mensal (P, mm) em seis localidades do Brasil: São Gabriel, RS (A); Otacílio Costa, SC (B); Guanhões, MG (C); Niquelândia, GO (D); Inhambupe, BA (E) e Monte Dourado, PA (F), considerando-se o ciclo de avaliação de 1º junho de um ano a 31 de julho do ano seguinte. Linha tracejada representa a média climatológica do período.

Já para as regiões de transição Sudeste e Centro-Oeste, representadas pelas localidades GNS (Figura 4.6C) e NQL (Figura 4.6D), respectivamente, em praticamente todos os anos as medianas de P ficaram abaixo da média climatológica. Os máximos valores de P observados para GNS ocorreram em anos de LN, com $P = 607,3$ mm e em anos neutros para NQL, com $P = 754,0$ mm, enquanto que os menores valores máximos de P foram observados em anos neutros e EN, respectivamente, com P de 514,8 mm e 573,4 mm, ou seja, não houve uma influência definida dos eventos de ENOS nessas regiões (MINUZZI et al., 2010; MARCUZZO; ROMERO, 2013).

Para a variável irradiação solar global média diária (Qg) para cada mês, as amplitudes médias de Qg foram maiores nas localidades da região Sul – SGB (Figura 4.8A) e OTC (Figura 4.8B), seguidas pelas regiões Sudeste e Centro-Oeste – GNS (Figura 4.8C) e NQL (Figura 4.8D) e pelas regiões Nordeste e Norte – INP (Figura 4.8E) e MDR (Figura 4.8F). As localidades das regiões Sudeste e Centro-Oeste foram também as que apresentaram a maior quantidade de *outliers* ao longo do período de avaliação. Os valores de Qg médios mensais também variaram de evento para evento, sendo maiores nos anos de EN para Guanhães ($Qg = 26,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), Niquelândia ($Qg = 23,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e Monte Dourado ($Qg = 23,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), enquanto que para Inhambupe, o valor máximo de Qg mensal foi de $25,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e nas localidades do Sul, os máximos foram observados em anos neutros ($Qg = 27,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para SGB e $Qg = 23,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para OTC).

Estudos sobre a variação da radiação solar global no Brasil são escassos, porém espera-se que a sua relação com os eventos de ENOS seja o oposto do que é observado para a chuva, devido a relação inversa entre Qg e nebulosidade. Em um estudo sobre a sensibilidade de Qg, velocidade do vento e precipitação na região da Califórnia em anos de ENOS, Mohammadi e Goudarzi (2018) encontraram que os impactos dos eventos de EN e LN nessas variáveis são diferentes e que dependem da intensidade destes eventos, além da posição geográfica e sazonalidade.

Figura 4.8. Variabilidade anual e interanual da irradiação solar global média mensal (Q_g , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) em seis localidades do Brasil: São Gabriel, RS (A); Otacílio Costa, SC (B); Guanhões, MG (C); Niquelândia, GO (D); Inhambupe, BA (E) e Monte Dourado, PA (F), considerando-se o ciclo de avaliação de 1º junho de um ano a 31 de julho do ano seguinte. Linha tracejada representa a média climatológica do período.

4.3.2. Efeito do ENOS na produtividade do eucalipto

Mesmo em condições ótimas de manejo, a variabilidade climática tem um papel importante na definição da produtividade florestal, resultando também na sua variabilidade interanual (STAPE et al., 2010; BINKLEY et al., 2017), a qual pode ser identificada pela variação dos Incrementos Correntes Anuais Potencial (ICA_{PP}), atingível (ICA_{PA}) e pelas Quebras de ICA (Q_{ICA}), no 3º ano do ciclo do eucalipto, durante o período de 1983 a 2015 (Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8).

Tabela 4.6. Incremento Corrente Anual Potencial (ICA_{PP}) máximo, mínimo e médio absolutos, considerando-se o 3º ano do ciclo do eucalipto, no período de 1983 a 2015 em eventos de El Niño, La Niña e Neutros, em diferentes localidades brasileiras.

Local*	Clone	El Niño			La Niña			Neutro		
		Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med
ARC	A1	135,1	121,3	128,7	132,2	117,6	125,7	132,3	122,7	127,1
ARP	A1	103,7	80,3	96,3	111,2	93,9	102,6	108,4	80,8	95,1
BOR	A1	125,8	111,1	120,7	126,9	116,3	121,6	123,0	114,0	119,4
CPS	A1	136,7	124,7	131,1	139,5	127,8	132,1	137,0	125,9	130,8
GNS	A1	129,7	115,2	124,1	129,1	118,3	123,4	126,4	116,3	121,5
INP	A1	136,9	124,0	129,6	142,8	124,7	130,7	136,6	124,8	131,6
MDR	A1	142,5	129,1	136,5	141,5	128,2	133,8	140,5	129,2	135,6
NQL	A1	151,0	59,5	128,2	141,9	58,3	127,3	140,9	123,9	128,4
OTC	A1	94,4	50,9	66,7	96,7	48,7	70,0	98,8	52,3	69,7
PEX	A1	152,9	136,6	143,9	147,6	137,1	142,2	147,4	135,8	140,1
SGB	A1	100,3	75,9	88,3	104,6	81,7	89,7	101,0	67,3	89,0
UBS	A1	154,2	143,8	148,8	151,5	139,7	146,4	150,5	139,9	146,0
ARC	C3	123,8	111,2	118,0	121,2	107,8	115,2	121,3	112,5	116,5
ARP	C3	100,3	82,2	94,4	105,5	91,4	98,1	102,4	87,9	94,2
BOR	C3	115,3	101,8	110,8	116,3	106,6	111,7	112,8	105,6	110,0
CPS	C3	125,3	114,3	120,2	127,9	117,1	121,1	125,5	115,4	119,9
GNS	C3	118,9	105,6	113,8	118,3	108,4	113,1	115,9	106,6	111,4
INP	C3	125,5	113,7	118,8	130,9	114,3	119,8	125,2	114,4	120,6
MDR	C3	130,6	118,4	125,2	129,7	117,5	122,7	128,8	118,4	124,3
NQL	C3	138,4	56,2	117,6	130,0	55,1	116,8	129,1	113,6	117,7
OTC	C3	93,0	57,5	72,7	89,5	56,9	74,0	91,5	60,5	74,6
PEX	C3	140,2	125,2	131,9	135,3	125,6	130,3	135,1	124,5	128,4
SGB	C3	99,0	81,8	90,2	96,8	82,4	90,9	100,2	73,2	91,0
UBS	C3	141,4	131,8	136,4	138,9	128,0	134,2	137,9	128,3	133,8

ARC: Aracruz-ES, ARP: Arapoti-PR, BOR: Borebi-SP, CPS: Chapadão do Sul-MS, GNS: Guanhães-MG, INP: Inhambupe-BA, MDR: Monte Dourado-PA, NQL: Niquelândia-GO, OTC: Otacílio Costa-SC, PEX: Peixe-TO, SGB: São Gabriel-RS e UBS: Urbano Santos-MA.

Para o clone A1, os valores médios de ICA_{PP} (Tabela 4.6) máximos e mínimos variaram em todos os eventos de ENOS entre as localidades de OTC e UBS, respectivamente

com valores de $66,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $148,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ em anos de El Niño, de $70,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $146,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ em anos de La Niña, e de $69,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $146,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ em anos neutros. Mesmo padrão foi encontrado para os valores de ICA_{PP} para o clone C3, com valores de $72,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $136,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ em anos de El Niño, de $74,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $134,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ em anos de La Niña, e de $74,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $133,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para anos neutros, para OTC e UBS, respectivamente, demonstrando que também existe variação entre as produtividades de diferentes clones de eucalipto com suas respectivas tolerâncias à extremos de temperatura (STAPE et al., 2010; GONÇALVES et al., 2013, 2017). Esta diferença entre os valores de ICA_{PP} , deve-se principalmente à localização geográfica dessas localidades, que influencia a quantidade de radiação solar recebida, afetando a amplitude térmica e fotoperiódica que depois serão convertidos em biomassa (DOORENBOS; KASSAM, 1994; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

Os maiores valores médios de ICA_{PP} variaram tanto entre as localidades quanto entre os eventos de ENOS (Tabela 4.6). Para o clone A1, os maiores valores médios de ICA_{PP} foram encontrados em cinco (ARC – $128,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; GNS – $124,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; MDR – $136,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; PEX – $143,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e UBS – $148,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) das 12 localidades em eventos de El Niño; cinco em eventos de La Niña (ARP – $102,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; BOR – $121,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; CPS – $132,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; OTC – $70,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e SGB – $89,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e dois em anos neutros (INP – $131,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e NQL – $128,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Já para o clone C3, a quantidade de localidades com maiores incrementos potenciais em eventos de ENOS foi: 5 em El Niño (ARC – $118,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; GNS – $113,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; MDR – $125,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; PEX – $131,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e UBS – $136,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), 3 em La Niña (ARP – $98,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; BOR – $111,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e CPS – $121,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e em 4 localidades em anos neutros (INP – $120,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; NQL – $117,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; OTC – $74,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e SGB – $91,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$).

Os valores mínimos, máximos e médios de ICA_{PA} podem ser observados na Tabela 4.7. Assim como para o ICA_{PP} , houve variação de ICA_{PA} entre as localidades e os eventos de ENOS. O ICA_{PA} é extremamente influenciado pela disponibilidade de água para as florestas (DOORENBOS; KASSAM, 1994), acarretando em grandes diferenças entre as localidades que possuem regimes pluviométricos distintos e entre a tolerância dos clones à seca (GONÇALVES et al., 2013, 2017; BINKLEY et al., 2017).

Como exemplo, tem-se que, para os clones A1 e C3, os maiores valores de ICA_{PA} médios foram observados para a localidade de MDR, PA, em todos os eventos de ENOS, com valores de ICA_{PA} para o clone A1 iguais a $105,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (EN), $109,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (LN) e $112,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (NE), enquanto que para o clone C3, os valores de ICA_{PA} foram de $88,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (EN),

93,6 m³ ha⁻¹ (LN) e 97,1 m³ ha⁻¹ (NE). Já os menores valores de ICA_{PA}, também em todos os eventos de ENOS, foram para as localidades de INP, BA, para o clone A1 (EN – 52,7 m³ ha⁻¹, LN – 54,6 m³ ha⁻¹ e NE – 60,1 m³ ha⁻¹) e UBS, MA, para o clone C3 (EN – 25,0 m³ ha⁻¹, LN – 19,7 m³ ha⁻¹ e NE – 25,9 m³ ha⁻¹). A localidade MDR possui classificação climática Am, ou seja, maior disponibilidade de água durante o ciclo, enquanto que INP e UBS, classificadas como As e Aw, respectivamente, possuem estações secas, afetando a disponibilidade hídrica para as florestas (ALVARES et al., 2013).

Tabela 4.7. Incremento Corrente Anual Atingível (ICA_{PA}) máximo, mínimo e médio absolutos, considerando-se o 3º ano do ciclo do eucalipto, no período de 1983 a 2015, para os eventos de El Niño, La Niña e Neutros, em diferentes localidades brasileiras.

Local	Clone	El Niño			La Niña			Neutro		
		Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med
ARC	A1	106,7	16,8	70,1	98,4	66,4	82,3	99,2	55,8	76,2
ARP	A1	98,2	73,4	86,5	99,1	77,0	89,2	89,9	72,6	83,5
BOR	A1	103,5	61,9	81,9	92,1	64,0	79,5	93,2	69,6	82,4
CPS	A1	99,0	61,5	81,7	98,4	72,4	82,4	104,3	52,1	81,8
GNS	A1	82,9	53,1	71,3	79,4	53,7	68,5	75,6	54,7	67,9
INP	A1	77,2	34,0	52,7	86,6	37,2	54,6	78,6	27,6	60,1
MDR	A1	115,6	92,0	105,1	117,6	97,9	109,4	117,8	99,7	112,1
NQL	A1	66,8	31,2	56,9	68,9	25,2	56,1	76,4	51,2	64,4
OTC	A1	84,5	46,4	62,5	85,7	44,5	64,1	86,8	45,2	61,3
PEX	A1	71,6	39,1	61,4	68,8	54,3	61,8	70,5	48,3	62,7
SGB	A1	88,3	60,2	73,7	89,7	43,2	61,0	77,5	52,2	67,7
UBS	A1	79,4	50,1	62,2	78,6	33,7	60,6	89,2	28,8	61,8
ARC	C3	93,8	5,4	53,0	82,6	44,1	64,2	82,9	36,7	58,7
ARP	C3	94,1	71,6	81,9	88,3	70,0	81,5	85,0	72,2	79,5
BOR	C3	89,3	46,6	66,3	77,7	48,1	63,3	79,4	52,8	67,2
CPS	C3	82,7	46,5	63,8	82,5	49,2	63,7	88,6	29,0	64,3
GNS	C3	64,6	39,1	53,7	58,6	35,1	51,6	58,7	34,7	52,2
INP	C3	55,6	14,7	27,9	54,5	8,3	23,3	53,6	5,1	30,6
MDR	C3	101,7	69,8	88,7	104,5	78,6	93,6	103,3	85,4	97,1
NQL	C3	51,8	18,1	33,5	51,2	10,0	30,5	58,3	20,5	41,4
OTC	C3	86,6	54,1	66,6	85,6	50,8	66,0	78,0	46,5	63,1
PEX	C3	46,0	13,7	33,6	44,9	23,0	31,2	47,0	14,4	35,5
SGB	C3	88,9	53,1	69,6	83,6	36,6	53,2	71,0	46,7	61,6
UBS	C3	44,6	14,0	25,0	34,7	2,8	19,7	57,7	3,4	25,9

ARC: Aracruz-ES, ARP: Arapoti-PR, BOR: Borebi-SP, CPS: Chapadão do Sul-MS, GNS: Guanhões-MG, INP: Inhambupe-BA, MDR: Monte Dourado-PA, NQL: Niquelândia-GO, OTC: Otacílio Costa-SC, PEX: Peixe-TO, SGB: São Gabriel-RS e UBS: Urbano Santos-MA.

A quantidade de maiores valores médios de ICA_{PA} foi diferente da encontrada para os valores de ICA_{PP} , com maiores valores em anos neutros para ambos os clones (Tabela 4.7). Em eventos de EN, para os clones A1 e C3, em quatro dos 12 clones, foram observados os maiores valores de ICA_{PA} médios, para eventos de La Niña foi de três localidades para o clone A1 e uma localidade para o clone C3, enquanto que para anos neutros, os maiores valores de ICA_{PA} foram observados em cinco localidades para o clone A1 (BOR – $82,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, INP – $60,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, MDR – $112,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, NQL – $64,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e PEX – $62,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e sete localidades para o clone C3 (BOR – $67,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, CPS – $64,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, INP – $30,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, MDR – $97,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, NQL – $41,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, PEX – $35,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e UBS – $25,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$).

As quebras de produtividade médias, máximas e mínimas de eucaliptos dadas pela Q_{ICA} , durante os eventos de ENOS são apresentadas na Tabela 4.8. As localidades que apresentaram maiores e menores valores de Q_{ICA} para ambos os clones e em todos os eventos de ENOS foram UBS e OTC, com valores de Q_{ICA} variando, respectivamente, entre $86,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $4,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ em eventos de EN, $85,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $5,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ em eventos de LN e $84,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $8,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ em anos neutros, para o clone A1, e entre $6,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $111,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (EN), $8,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $114,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (LN) e entre $11,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $107,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (NE), para o clone C3.

Grande parte da perda de produtividade de eucaliptos está relacionada à deficiência hídrica durante o ciclo de cultivo que influencia diretamente na adaptação e desempenho dos clones cultivados, como foi observado para as localidades OTC e UBS que possuem regimes pluviométricos distintos (STAPE et al., 2010; BINKLEY et al., 2017; GONÇALVES et al., 2017).

Analisando-se a quantidade de localidades com menores perdas de ICA devido ao déficit hídrico, tem-se que isso aconteceu em quatro localidades para eventos de El Niño, uma localidade para eventos de La Niña e sete localidades em anos neutros para o clone A1. Mesmo padrão foi observado para o clone C3, com três localidades com menores perdas em anos de EN, uma em anos de LN e oito em anos classificados como neutros. Para ambos os clones, as localidades que apresentaram menores valores de Q_{ICA} foram as situadas no sul do país, que, em anos de EN, possuem um aumento no regime pluviométrico da região (GRIMM, 2003). Em relação às maiores perdas de ICA em eventos de ENOS, essas ocorreram, para o clone A1, em seis localidades em anos de EN (ARC – $58,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, INP – $76,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, MDR – $31,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, NQL – $71,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, PEX – $82,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e UBS – $86,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, cinco localidades em anos de LN e um em anos neutros. Esses maiores valores de Q_{ICA} foram em localidades das regiões Norte e Nordeste, onde há uma diminuição nos acumulados de chuva durante anos de El Niño (GRIMM, 2003, 2004). Já para o clone C3, a maior quantidade de

localidades com maiores valores de Q_{ICA} foi em eventos de La Niña, com nove localidades (ARP – 16,5 m³ ha⁻¹, BOR – 48,4 m³ ha⁻¹, CPS – 57,4 m³ ha⁻¹, GNS – 61,6 m³ ha⁻¹, INP – 96,5 m³ ha⁻¹, NQL – 86,3 m³ ha⁻¹, PEX – 99,2 m³ ha⁻¹, SGB – 37,7 m³ ha⁻¹ e UBS – 114,5 m³ ha⁻¹), comparados a duas localidades em eventos de El Niño e uma em anos neutros.

Tabela 4.8. Quebra de Incremento Corrente Anual (Q_{ICA} = ICAPP-ICAPA) máximo, mínimo e médio absolutos, considerando-se o 3º ano do ciclo do eucalipto, no período de 1983 a 2015 em eventos de El Niño, La Niña e Neutros, em diferentes localidades brasileiras.

Local	Clone	El Niño			La Niña			Neutro		
		Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med
ARC	A1	118,3	14,6	58,7	63,3	24,2	43,5	72,0	28,8	50,9
ARP	A1	20,7	3,4	9,8	20,1	6,1	13,4	22,3	4,8	11,6
BOR	A1	63,9	20,3	38,8	56,1	25,3	42,1	53,4	27,1	37,1
CPS	A1	74,0	28,2	49,3	63,2	29,3	49,7	84,5	25,6	49,0
GNS	A1	72,7	37,8	52,8	75,4	43,7	54,9	70,0	44,6	53,6
INP	A1	100,4	51,2	76,9	100,4	39,3	76,2	107,5	47,8	71,5
MDR	A1	50,5	16,9	31,4	41,7	13,1	24,4	36,2	12,7	23,5
NQL	A1	105,3	28,2	71,3	84,1	33,1	71,2	84,2	51,3	64,0
OTC	A1	10,0	1,8	4,3	18,1	2,7	5,9	16,7	3,0	8,4
PEX	A1	113,8	69,6	82,5	93,3	71,7	80,4	99,1	65,3	77,5
SGB	A1	31,8	4,7	14,5	39,9	8,3	28,8	26,5	14,0	21,4
UBS	A1	100,9	66,1	86,5	111,8	67,5	85,8	121,5	50,7	84,1
ARC	C3	118,5	17,4	65,1	77,1	28,7	51,1	80,5	34,4	57,8
ARP	C3	25,8	4,3	12,5	23,9	7,8	16,5	27,4	6,5	14,7
BOR	C3	68,7	24,2	44,5	62,0	29,9	48,4	60,0	31,0	42,8
CPS	C3	77,7	33,9	56,4	71,6	34,6	57,4	96,5	30,4	55,6
GNS	C3	76,2	44,9	60,1	83,2	53,2	61,6	79,6	47,9	59,2
INP	C3	108,2	62,2	90,9	118,5	67,2	96,5	118,7	65,7	90,0
MDR	C3	60,8	19,8	36,4	49,0	15,3	29,0	39,1	15,1	27,2
NQL	C3	119,6	38,0	84,2	105,2	45,0	86,3	98,6	58,8	76,4
OTC	C3	12,1	2,9	6,1	25,6	3,1	8,1	22,4	4,7	11,5
PEX	C3	126,5	80,2	98,3	112,3	82,0	99,2	120,6	77,5	92,9
SGB	C3	40,2	7,0	20,6	53,9	10,9	37,7	43,6	18,6	29,5
UBS	C3	127,3	88,7	111,4	130,6	99,3	114,5	134,4	70,6	107,9

ARC: Aracruz-ES, ARP: Arapoti-PR, BOR: Borebi-SP, CPS: Chapadão do Sul-MS, GNS: Guanhães-MG, INP: Inhambuê-BA, MDR: Monte Dourado-PA, NQL: Niquelândia-GO, OTC: Otacílio Costa-SC, PEX: Peixe-TO, SGB: São Gabriel-RS e UBS: Urbano Santos-MA.

A seguir são apresentadas as variações do Incremento Corrente Anual potencial (ICA_{PP}), atingível (ICA_{PA}) e as quebras de Incremento Corrente Anual devido ao déficit hídrico (Q_{ICA}) para o clone A1 (*E. urophylla* x *sp*), durante o 3º ano do ciclo para plantios iniciados entre 1981 e 2013 para as seis localidades utilizadas na avaliação das variáveis meteorológicas descritas no item anterior. As figuras da variação temporal de ICA para as

demais localidades, para o clone C3 e as tabelas com as porcentagens de anos acima, abaixo e dentro do intervalo da Variação Interquartil (IQR), encontram-se no APÊNDICE A, B e C, respectivamente.

Para a localidade de São Gabriel (Figura 4.9), em todos os eventos de ENOS, a porcentagem de anos com ICA_{PP} dentro do intervalo da Variação Interquartil (IQR) foi maior, representando 45,5% em anos de EN, 41,7% em anos de LN e 70% em anos neutros, ou seja, em geral, não houve extremos de produtividade potencial durante o período analisado. Já para os valores de ICA_{PA} , a porcentagem de anos dentro e acima do IQR em anos de El Niño foi próxima, sendo de 54,5% e 45,5%, respectivamente, não tendo nenhum ano com ICA_{PA} abaixo desse intervalo. Em anos neutros, a maior porcentagem também foi para valores de ICA_{PA} dentro do intervalo, representando 70% dos 10 anos classificados como neutros. Já em anos de La Niña, a maior porcentagem foi observada em anos com ICA_{PA} abaixo da média (58,3%), ou seja, mais uma vez a redução dos acumulados de chuva na região Sul do país gerou impactos negativos na produtividade do eucalipto.

Para Otacílio Costa (Figura 4.10), a maior porcentagem de valores de ICA_{PP} dentro do intervalo IQR também foi nos eventos de ENOS, com 45,5% para EN, 50% para LN e 60% em anos neutros. Para os valores de ICA_{PA} , as maiores porcentagens também foram encontradas dentro do intervalo IQR, representando 54,5% em anos de EN e 50% para anos de LN e neutros. Em relação às quebras de ICA, 45,5% de Q_{ICA} concentrou-se igualmente em anos de El Niño dentro e abaixo do intervalo IQR e o mesmo em anos neutros, porém com cerca de 50% para valores acima e dentro do intervalo IQR. Já dos 12 anos de La Niña, em 58,3% dos anos, os valores de Q_{ICA} ficaram dentro do intervalo IQR, ou seja, não é possível identificar a influência de ENOS na produtividade nesta localidade.

Assim como para as localidades do Sul do país, em Guanhães, MG (Figura 4.11), as maiores porcentagens de anos com os valores de produtividade potencial concentraram-se dentro do intervalo IQR para todos os eventos de ENOS, chegando a 60% em anos neutros. Para os valores de ICA_{PA} e Q_{ICA} , as maiores porcentagens observadas concentraram-se também dentro do intervalo IQR, com máximos em anos neutros para valores de ICA_{PA} (60%) e máximos em anos de La Niña para as quebras de produtividade Q_{ICA} , com porcentagem de 58,3% dos anos. Esses resultados mostram que, assim como para OTC, não é possível identificar a influência do ENOS na produtividade de eucaliptos, o que corrobora com o fato de que o efeito do ENOS no clima da região Sudeste não ser bem definido (MINUZZI et al., 2010).

Em Niquelândia, GO (Figura 4.12), por sua vez, os valores de ICA_{PP} concentraram-se dentro do intervalo IQR para todos os eventos, com máximo em anos de La Niña, com 58,3% dos anos. Já para os valores de ICA_{PA} , a porcentagem de anos dentro do intervalo é maior para os eventos de EN (45,5%) e LN (66,7%), enquanto que para anos neutros, a maior porcentagem foi observada para valores acima do intervalo, ou seja, indicando um aumento da produtividade nestes anos. Tal fato pode ser também verificado pela maior porcentagem de anos com valores de quebras de produtividade menores que o intervalo IQR, representando cerca de 50% e que em anos de El Niño, segundo Marcuzzo e Romero (2013) para o estado de Goiás, os valores acumulados de precipitação são bastante variáveis, impactando na produtividade das culturas.

Para Inhambupe, BA (Figura 4.13), as porcentagens de anos com valores de ICA_{PP} , ICA_{PA} e Q_{ICA} acima, abaixo e dentro do intervalo IQR também se concentraram dentro do intervalo, com valores máximos de porcentagem em anos de El Niño para ICA_{PP} (63,6%), ICA_{PA} (72,7%) e também Q_{ICA} , com 72,7% dos 11 anos classificados como El Niño com valores de Q_{ICA} dentro do intervalo IQR. Com isso, assim como para as localidades de Otacílio Costa, SC e Guanhães, MG, não é possível identificar a influência dos eventos do ENOS na produtividade de eucalipto para o clone A1 em Inhambupe. Fato importante é que Inhambupe fica na região Nordeste, na qual o sinal do ENOS é um pouco mais definido que nas demais regiões do Brasil, onde nos anos de El Niño há uma maior tendência de diminuição das chuvas (GRIMM, 2003; CIRINO et al., 2015).

Representando a região Norte do país, os valores de ICA_{PP} para Monte Dourado, PA (Figura 4.14), ficaram dentro do intervalo IQR para os eventos de La Niña e Neutros, com porcentagens de 58,3% e 70%, respectivamente, enquanto que para eventos de El Niño foi observada maior porcentagem de anos com valores de ICA_{PP} maiores que o intervalo, esta de 45,5%, ou seja, valores maiores de produtividade potencial. Porém, mesmo com maiores valores de ICA_{PP} em anos de EN, nestes anos foi observada maior porcentagem de ICA_{PA} menores que o intervalo IQR (45,5%). Já as maiores porcentagens de quebras de produtividade ficaram no intervalo IQR em todos os eventos, chegando a 58,3% dos anos em condições de La Niña. O fato dos valores de ICA_{PP} concentrarem-se em sua maioria acima do intervalo em anos de El Niño pode ser explicado pelo aumento da temperatura do ar neste período e a diminuição dos acumulados de precipitação na região, o que explica a maior porcentagem de anos com valores de ICA_{PA} abaixo do intervalo IQR (ASNER; TOWNSEND; BRASWELL, 2000; GRIMM, 2003).

Figura 4.9. Variação anual do incremento corrente anual potencial (A, ICA_{PP}), atingível (B, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (*E. urophylla* x *sp*), em São Gabriel, RS, no período de 1983 a 2015.

Figura 4.10. Variação anual do incremento corrente anual potencial (A, ICA_{PP}), atingível (B, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C, $\text{QICA} = \text{ICA}_{\text{PP}} - \text{ICA}_{\text{PA}}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (*E. urophylla* x *sp*), em Otacílio Costa, SC, no período de 1983 a 2015.

Figura 4.11. Variação anual do incremento corrente anual potencial (A, ICA_{PP}), atingível (B, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C, $\text{QICA} = \text{ICA}_{\text{PP}} - \text{ICA}_{\text{PA}}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (*E. urophylla* x *sp*), em Guanhães, MG, no período de 1983 a 2015.

Figura 4.12. Variação anual do incremento corrente anual potencial (A, ICA_{PP}), atingível (B, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (*E. urophylla* x *sp*), em Niquelândia, GO, no período de 1983 a 2015.

Figura 4.13. Variação anual do incremento corrente anual potencial (A, ICA_{PP}), atingível (B, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (*E. urophylla* x *sp*), em Inhambupe, BA, no período de 1983 a 2015.

Figura 4.14. Variação anual do incremento corrente anual potencial (A, ICA_{PP}), atingível (B, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (*E. urophylla* x *sp*), em Monte Dourado, PA, no período de 1983 a 2015.

Uma análise geral da influência do ENOS na produtividade de eucalipto, nos valores acumulados de excedente (EXCac) e de deficiência hídrica (DEFac) e na evapotranspiração relativa (ETrel) para cada uma das 12 localidades e para os dois clones avaliados é apresentada nas Figuras 4.15 a 4.26.

Os valores de EXCac e DEFac durante 3º ano do ciclo do eucalipto no período de 1983 a 2015 variaram significativamente entre as localidades. Os valores máximos de EXCac foram observados em anos de La Niña para as localidades de OTC com EXCac igual a 1720 mm ano⁻¹ (Figura 4.16H), seguido de UBS, 1620 mm ano⁻¹ (Figura 4.24H), e MDR 1630 mm ano⁻¹ (Figura 4.25H), enquanto que os maiores acumulados de DEF ficaram entre as localidades de UBS em anos neutros (DEFac = 1330 mm ano⁻¹, Figura 4.24G) e ARC (DEFac = 1310 mm ano⁻¹, Figura 4.18G) e INP (DEFac = 1180 mm ano⁻¹, Figura 4.23G) em anos de El Niño. Já os menores acumulados de DEF foram encontrados para as localidades da região Sul do país em anos de El Niño, com valores de deficiência acumulada mínima entre 20 mm ano⁻¹ e 70 mm ano⁻¹ para as localidades de ARP (Figura 4.15G) e SGB (Figura 4.17G), respectivamente. Essa variação, tanto de DEFac quanto do EXCac é diretamente influenciada pela variação interanual da precipitação nas localidades e as respostas nas produtividades das culturas variam substancialmente entre os diferentes clones e suas tolerâncias aos períodos muito secos ou muito úmidos (STAPE et al., 2010; GONÇALVES et al., 2017).

A evapotranspiração relativa (ETrel), dada pela relação entre a evapotranspiração real (ETr) e a evapotranspiração máxima (ETc) da cultura do eucalipto, é uma boa maneira de quantificar o efeito da deficiência hídrica na produtividade, já que quanto menor o seu valor, maior será seu efeito (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Como esperado, as regiões de menor DEFac foram as que registraram os maiores valores de ETrel médio entre as localidades, com valores de ETrel variando entre 0,96 para SGB (Figura 4.17I) e 0,98 para OTC (Figura 4.16I) em anos de El Niño, onde a região Sul do país registra maiores acumulados de precipitação (BERLATO; FONTANA, 2003). Já os menores valores de ETrel variaram entre 0,38 para ARC (Figura 4.18I) e 0,48 para PEX (Figura 4.26I) e INP (Figura 4.23I), e ambos valores foram também encontrados em anos sob influência do El Niño, mostrando que existe uma grande variabilidade climática ocasionada por este fenômeno.

Em uma análise dos valores de ICA_{PP} entre as regiões brasileiras (Tabela 4.6), tem-se que para as localidades da região Sul (Figuras 4.15-17A e 4.15-17D), em média, os maiores valores de produtividade potencial foram encontrados em anos de La Niña para o clone A1, como consequência do aumento da temperatura causada por este fenômeno (BERLATO; FONTANA, 2003) e em anos Neutros para o clone C3. Entretanto, os valores de ICA_{PP} foram, em geral, menores que as demais regiões do país, devido a menor disponibilidade de energia, principalmente nos meses de outono e inverno. Para as localidades analisadas da

região Norte (Figuras 4.25-26A e 4.25-26D), os maiores valores de ICA_{PP} foram observados em anos de El Niño, enquanto que para as regiões Sudeste (Figuras 4.18-20A e 4.18-20D), Centro-Oeste (Figuras 4.21-22A e 4.21-22D) e Nordeste (Figuras 4.23-24A e 4.23-24D), os maiores valores de ICA_{PP} variaram entre os eventos de ENOS, não sendo possível encontrar um certo padrão. Este fato pode ser associado às principais variáveis meteorológicas que são consideradas na estimação da produtividade potencial, as quais possuem um ciclo anual bem definido e as anomalias são menos expressivas que para a variável precipitação, por exemplo.

Já a influência dos eventos de ENOS no ICA_{PA} foi bastante variável entre as regiões e entre localidades de uma mesma região, principalmente para o clone A1 (Tabela 4.7). Para a região Sul (Figuras 4.15-17B e 4.15-17E) os maiores valores de produtividade atingível foram encontrados em anos sob influência do El Niño, devido, principalmente, à maior disponibilidade hídrica na região para que a cultura pudesse desenvolver (BERLATO; FONTANA, 2001; GRIMM, 2003). Para as localidades das regiões do Centro-Oeste (Figuras 4.21-22B e 4.21-22E), Nordeste (Figuras 4.23-24B e 4.23-24E) e Norte (Figuras 4.25-26B e 4.25-26E), a influência do ENOS no ICA_{PA} , em geral foi maior em anos neutros, repercutindo nos seus maiores valores de ICA_{PA} para esses anos. Para as localidades da região Sudeste (Figuras 4.18-20B e 4.18-20E), em ambos os clones, os maiores valores de ICA_{PA} variaram entre os eventos, justificando também pelo sinal não definido do ENOS na região (MINUZZI, 2003; MINUZZI et al., 2010).

Assim como encontrado para os valores de ICA_{PP} e ICA_{PA} , para as quebras de produtividade de ICA (Q_{ICA}) não houve uniformidade da influência do ENOS nestas perdas (Tabela 4.8). Em ambos os clones, para as localidades da região Sul (Figuras 4.15-17C e 4.15-17F), foram encontradas menores perdas média de ICA em anos de El Niño e maiores perdas em anos de La Niña, devido principalmente à diminuição dos acumulados de chuva nessa região (BERLATO; FONTANA, 2001, 2003). Assim como observado para ICA_{PP} e ICA_{PA} , para as localidades da região Sudeste (Figuras 4.18-20C e 4.18-20F), os menores valores médios de perda variaram entre as localidades, porém, os maiores valores foram encontrados em anos de La Niña para BOR (Figura 4.19C e 4.19F) e GNS (Figura 4.20C e 4.20F), enquanto que para ARC, ES (Figura 4.18C e 4.18F) houve uma tendência de diminuição de Q_{ICA} em anos de La Niña e grande amplitude de Q_{ICA} em anos de El Niño, da ordem de $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Para as demais localidades, os valores médios de Q_{ICA} foram ligeiramente maiores em anos de El Niño para o clone A1, e em anos de La Niña para o clone C3. Porém, as menores perdas médias de ICA foram observadas em anos neutros para os dois clones, mostrando mais

uma vez a importância de se utilizar clones mais adaptados de acordo com a localidade de produção de interesse (STAPE et al., 2010; GONÇALVES et al., 2013; BINKLEY et al., 2017).

Rolim et al. (2005), estudando perdas de biomassa em florestas tropicais no Brasil, encontraram também um aumento da mortalidade das árvores em anos de El Niño, chegando a 17,1% de perda durante o período de 1986 a 1989. Smith, Renton e Reid (2017), em um estudo do crescimento e alocação de carbono em espécies de *Eucalyptus camaldulensis* na Austrália, constaram que em condições de El Niño, o crescimento e as taxas de sequestro de C são menores, pois as árvores entram em um ‘modo de sobrevivência’ com a redução da disponibilidade de água, resultando em menor taxa de crescimento das árvores.

Propastin, Fotso e Kappas (2010), estudando a vulnerabilidade da vegetação africana aos eventos de ENOS, encontraram que os extremos climáticos causados pelo ENOS impactaram distintamente os diferentes tipos de vegetação e que 16% da área de vegetação africana total pode ser caracterizada por ter moderada vulnerabilidade aos eventos de El Niño, enquanto que 1,18% desta área mostrou alta vulnerabilidade e estes extremos climáticos.

Figura 4.15. Incremento corrente anual potencial (A e D, ICA_{PP}), atingível (B e E, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C e F, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (A, B e C, *E. urophylla* x *sp*) e C3 (D, E, F, (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), deficiência hídrica acumulada (G, DEFac), excedente hídrico acumulado (H, EXCac) e evapotranspiração relativa (I, ETrel) para Arapoti, PR, em anos de El Niño, La Niña e Neutros, no período de 1983 a 2015.

Figura 4.16. Incremento corrente anual potencial (A e D, ICA_{PP}), atingível (B e E, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C e F, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (A, B e C, *E. urophylla* x *sp*) e C3 (D, E, F, (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), deficiência hídrica acumulada (G, DEFac), excedente hídrico acumulado (H, EXCac) e evapotranspiração relativa (I, ETrel) para Otacílio Costa – SC em anos de El Niño, La Niña e Neutros no período de 1983 a 2015.

Figura 4.17. Incremento corrente anual potencial (A e D, ICA_{PP}), atingível (B e E, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C e F, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (A, B e C, *E. urophylla* x *sp*) e C3 (D, E, F, (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), deficiência hídrica acumulada (G, DEFac), excedente hídrico acumulado (H, EXCac) e evapotranspiração relativa (I, ETrel) para São Gabriel – RS em anos de El Niño, La Niña e Neutros no período de 1983 a 2015.

Figura 4.18. Incremento corrente anual potencial (A e D, ICA_{PP}), atingível (B e E, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C e F, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (A, B e C, *E. urophylla* x *sp*) e C3 (D, E, F, (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), deficiência hídrica acumulada (G, DEFac), excedente hídrico acumulado (H, EXCac) e evapotranspiração relativa (I, ETrel) para Aracruz – ES em anos de El Niño, La Niña e Neutros no período de 1983 a 2015.

Figura 4.19. Incremento corrente anual potencial (A e D, ICA_{PP}), atingível (B e E, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C e F, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (A, B e C, *E. urophylla* x *sp*) e C3 (D, E, F, (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), deficiência hídrica acumulada (G, DEFac), excedente hídrico acumulado (H, EXCac) e evapotranspiração relativa (I, ETrel) para Borebi – SP em anos de El Niño, La Niña e Neutros no período de 1983 a 2015.

Figura 4.20. Incremento corrente anual potencial (A e D, ICA_{PP}), atingível (B e E, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C e F, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (A, B e C, *E. urophylla* x *sp*) e C3 (D, E, F, (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), deficiência hídrica acumulada (G, DEFac), excedente hídrico acumulado (H, EXCac) e evapotranspiração relativa (I, ETrel) para Guanhães – MG em anos de El Niño, La Niña e Neutros no período de 1983 a 2015.

Figura 4.21. Incremento corrente anual potencial (A e D, ICA_{PP}), atingível (B e E, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C e F, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (A, B e C, *E. urophylla* x *sp*) e C3 (D, E, F, (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), deficiência hídrica acumulada (G, DEFac), excedente hídrico acumulado (H, EXCac) e evapotranspiração relativa (I, ETrel) para Chapadão do Sul – MS em anos de El Niño, La Niña e Neutros no período de 1983 a 2015.

Figura 4.22. Incremento corrente anual potencial (A e D, ICA_{PP}), atingível (B e E, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C e F, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (A, B e C, *E. urophylla* x *sp*) e C3 (D, E, F, (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), deficiência hídrica acumulada (G, DEFac), excedente hídrico acumulado (H, EXCac) e evapotranspiração relativa (I, ETrel) para Niquelândia – GO em anos de El Niño, La Niña e Neutros no período de 1983 a 2015.

Figura 4.23. Incremento corrente anual potencial (A e D, ICA_{PP}), atingível (B e E, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C e F, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (A, B e C, *E. urophylla* x *sp*) e C3 (D, E, F, (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), deficiência hídrica acumulada (G, DEFac), excedente hídrico acumulado (H, EXCac) e evapotranspiração relativa (I, ETrel) para Inhambuê – BA em anos de El Niño, La Niña e Neutros no período de 1983 a 2015.

Figura 4.24. Incremento corrente anual potencial (A e D, ICA_{PP}), atingível (B e E, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C e F, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (A, B e C, *E. urophylla* x *sp*) e C3 (D, E, F, (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), deficiência hídrica acumulada (G, DEFac), excedente hídrico acumulado (H, EXCac) e evapotranspiração relativa (I, ETrel) para Urbano Santos – MA em anos de El Niño, La Niña e Neutros no período de 1983 a 2015.

Figura 4.25. Incremento corrente anual potencial (A e D, ICA_{PP}), atingível (B e E, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C e F, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (A, B e C, *E. urophylla* x *sp*) e C3 (D, E, F, (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), deficiência hídrica acumulada (G, DEFac), excedente hídrico acumulado (H, EXCac) e evapotranspiração relativa (I, ETrel) para Monte Dourado – PA em anos de El Niño, La Niña e Neutros no período de 1983 a 2015.

Figura 4.26. Incremento corrente anual potencial (A e D, ICA_{PP}), atingível (B e E, ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual (C e F, $Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (A, B e C, *E. urophylla* x *sp*) e C3 (D, E, F, (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), deficiência hídrica acumulada (G, DEFac), excedente hídrico acumulado (H, EXCac) e evapotranspiração relativa (I, ETrel) para Peixe – TO em anos de El Niño, La Niña e Neutros no período de 1983 a 2015.

Em um estudo da mortalidade de florestas tropicais de planície na região da Nicarágua Oriental, ocasionadas por queimada e seca associadas a eventos de ENOS, Granzow-de la Cerda et al. (2012) encontraram que os períodos de seca causados pelo ENOS

facilitaram a ocorrência de queimadas além de agravar o seu efeito na mortalidade das árvores.

Outros estudos envolvendo o efeito do ENOS nas florestas foram realizados por meio da análise dos anéis das árvores durante longos períodos. Rodríguez et al. (2005) identificaram boas correlações entre os eventos de ENOS e a largura dos anéis de Palo Santo (*Bursera graveolens*) em florestas do Peru, em uma análise de 50 anos de dados. Perone et al. (2016) estudando também o efeito de ENOS em anéis de *Araucaria araucana* e *Araucaria angustifolia* em regiões brasileiras e chilenas mostraram que, considerando um período de 2 a 7 anos, as variações ambientais locais relacionadas aos eventos de El Niño juntamente com os ciclos de atividade solar causaram flutuações em distintos níveis nos anéis das árvores.

A maioria dos estudos que envolve a identificação dos efeitos do ENOS no crescimento de florestas, como as de eucalipto são incipientes e precisam ser melhor elucidadas. Os resultados deste estudo mostraram que a influência do ENOS é muito variável entre os eventos e entre as localidades de uma mesma região, fazendo com que seja importante a avaliação deste evento em mais localidades a fim de tentar encontrar algum padrão ou tendência destes fenômenos. Em geral, percebeu-se que os anos de La Niña causaram mais perdas de produtividade no eucalipto, enquanto que as menores perdas foram observadas em anos neutros.

Por fim, pode-se afirmar que o modelo MZA-FAO adaptado foi uma ferramenta útil para avaliar a influência dos ENOS na produtividade do eucalipto nas regiões produtoras brasileiras, podendo também ser utilizado no estudo de estratégias que possam mitigar o efeito dos extremos climáticos no crescimento e produtividade florestal.

4.4. Conclusões

As produtividades e as perdas de produtividade do eucalipto durante a atuação de eventos de ENOS mostraram-se amplamente variáveis tanto espacialmente quanto temporalmente, como consequência dos diferentes regimes térmicos e hídricos das regiões produtoras.

Em geral, não houve uma identificação significativa da influência do ENOS na produtividade potencial, com exceção da região sudeste que apresentou uma leve tendência de aumento de ICA_{PP} em anos de El Niño. Entretanto, analisando a produtividade atingível, em anos classificados como neutros, houve um ligeiro aumento de ICA_{PA} em algumas localidades das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste, e em anos de El Niño, este ligeiro aumento foi

observado em localidades da região Sul, enquanto que para a região Sudeste, não foi possível estabelecer uma relação de aumento e/ou diminuição da produtividade atingível. As perdas de produtividade foram, em geral, maiores em anos de El Niño para as localidades de ARC, NQL, INP, UBS, MDR e PEX, seguida por anos de La Niña para as localidades de ARP, SGB, BOR, GNS e CPS e neutros para o clone A1, enquanto que para o clone C3 as perdas foram maiores em anos de La Niña para as localidades de ARP, SGB, BOR, GNS, CPS, NQL, INP, UBS e PEX, seguida por anos de El Niño nas localidades de ARC e MDR.

Referências

- ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas 2013: ano base 2012.** Disponível em: <<http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/anuario-ABRAF13-BR.pdf>>. Acesso em: 1 mar. 2016.
- ABREU, M. C.; MARTINS, F. B.; FREITAS, C. H. de; PEREIRA, R. A. de A.; MELLONI, E. G. P. Valores limítrofes para transpiração, desenvolvimento e crescimento de *Corymbia citriodora* (Hook.) K. D. Hill & L.A.S. Johnson em resposta à deficiência hídrica no solo. **Revista Árvore**, v. 39, n. 5, p. 841–852, 2015.
- ALEXANDER, M. A.; BLADÉ, I.; NEWMAN, M.; LANZANTE, J. R.; LAU, N. C.; SCOTT, J. D. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. **Journal of Climate**, v. 15, n. 16, p. 2205–2231, 2002.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. **Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO**, n. 56, p. 300, 1998.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDERSON, W.; SEAGER, R.; BAETHGEN, W.; CANE, M. Crop production variability in North and South America forced by life-cycles of the El Niño Southern Oscillation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 239, p. 151–165, 2017.

- ANDRÉS FERREYRA, R.; PODESTÁ, G. P.; MESSINA, C. D.; LETSON, D.; DARDANELLI, J.; GUEVARA, E.; MEIRA, S. A linked-modeling framework to estimate maize production risk associated with ENSO-related climate variability in Argentina. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 107, n. 3, p. 177–192, 2001.
- ANGSTRÖN, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 50, p. 121–126, 1924.
- ASNER, G. P.; TOWNSEND, A. R.; BRASWELL, B. H. Satellite observation of El Niño effects on Amazon forest phenology and productivity. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 7, p. 981–984, 2000.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Impacts of El Niño and La Niña on Agricultural Production in Southern Brazil and the Use of Climate. **Applications of climate forecasting for better decision-making processes in agriculture**, p. 217–243, 2001.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El niño e la niña : impactos no clima, na vegetação e na agricultura do rio grande do sul: aplicações de previsões climáticas na agricultura**. [s.l.] Editora da UFRGS, 2003.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, Í.; STAPE, J. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, n. July, p. 271–283, 2017.
- CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação de desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.
- CIRINO, P. H.; FÉRES, J. G.; BRAGA, M. J.; REIS, E. Assessing the Impacts of ENSO-related Weather Effects on the Brazilian Agriculture. **Procedia Economics and Finance**, v. 24, n. 15, p. 146–155, 2015.
- CPTEC/INPE - CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS / INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **El Niño e La Niña**. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/#>>. Acesso em: 23 abr. 2018.
- CUNHA, G. R.; DALMAGO, G. A.; ESTEFANEL, V. El nino - southern oscillation influences on wheat crop in brazil. **Wheat in a Global Environment**, n. 1992, p. 445–450, 2001.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306p.

- FREITAS, C. H. de; MARTINS, F. B.; ABREU, M. C. Cardinal temperatures for the leaf development of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla* seedlings. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 52, n. 5, p. 283–292, 2017.
- GARCIA, S. R.; SANTOS, D. F. dos; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R. Aspectos climatológicos associados ao cultivo da oliveira (*Olea Europaea* L.) em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, n. 14, p. 188–209, 2018.
- GOLDEN GATE WEATHER SERVICES. **El Niño and La Niña Years and Intensities**. Disponível em: <<http://ggweather.com/enso/oni.htm>>. Acesso em: 9 maio. 2018.
- GONÇALVES, J. L.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 79, n. 3, p. 169–183, 2017.
- GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6–27, 2013.
- GONZÁLEZ-ROUCO, J. F.; JIMÉNEZ, J. L.; QUESADA, V.; VALERO, F. Quality control and homogeneity of precipitation data in the southwest of Europe. **Journal of Climate**, v. 14, n. 5, p. 964–978, 2001.
- GRANZOW-DE LA CERDA, Í.; LLORET, F.; RUIZ, J. E.; VANDERMEER, J. H. Tree mortality following ENSO-associated fires and drought in lowland rain forests of Eastern Nicaragua. **Forest Ecology and Management**, v. 265, p. 248–257, 2012.
- GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: Regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, n. 2, p. 263–280, 2003.
- GRIMM, A. M. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? **Climate Dynamics**, v. 22, n. 2–3, p. 123–138, 2004.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=5930&z=t&o=29>>. Acesso em: 1 mar. 2016.
- IIZUMI, T.; LUO, J. J.; CHALLINOR, A. J.; SAKURAI, G.; YOKOZAWA, M.; SAKUMA, H.; BROWN, M. E.; YAMAGATA, T. Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. **Nature Communications**, v. 5, p. 1–7, 2014.

- KOUSKY, V. E.; HIGGINS, R. W. An Alert Classification System for Monitoring and Assessing the ENSO Cycle. **Weather and Forecasting**, v. 22, n. 2, p. 353–371, 2007.
- MARCUZZO, F. F. N.; ROMERO, V. Influência do El Niño E La Niña na precipitação máxima diária do Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 429–440, 2013.
- MARTINS, F. B. **Modelagem e crescimento em nível de árvore individual para plantios comerciais de eucaliptos**. 2011. 143f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- MARTINS, F. B.; SILVA, J. C. da; STRECK, N. A. Estimativa da temperatura-base para emissão de folhas e do filocrono em duas espécies de eucalipto na fase de muda. **Revista Árvore**, v. 31, n. 3, p. 373–381, 2007.
- MARTINS, F. B.; STRECK, N. A. Aparecimento de folhas em mudas de eucalipto estimado por dois modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1091–1100, 2007.
- MENDONÇA, A. R. de; CALEGARIO, N.; SILVA, G. F. da; CARVALHO, S. de P. C. Growth and yield models for eucalyptus stands obtained by differential equations. **Scientia Agricola**, v. 74, n. 5, p. 364–370, 2017.
- MINUZZI, R. B. **Influência dos fenômenos el niño e la niña nos veranicos do estado de Minas Gerais**. 2003. 96f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- MINUZZI, R. B.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, J. M. N. da; VIANELLO, R. L. Influência do fenômeno climático el niño no período chuvoso da região sudeste do Brasil. **Geografia**, v. 20, n. 2, p. 5–19, 2010.
- MOHAMMADI, K.; GOUDARZI, N. Study of inter-correlations of solar radiation, wind speed and precipitation under the influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) in California. **Renewable Energy**, v. 120, p. 190–200, 2018.
- OLIVEIRA, A. S. de; RIBEIRO, A.; SILVA, C. R. A.; XAVIER, A.; FREITAS, A. F. de. Modeling the Growth of Eucalyptus Plants Based on the Thermal Sum. **Revista Árvore**, v. 41, n. 2, p. 1–10, 2017.
- PAULA, R. R.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; OLIVEIRA NETO, S. N.; LEITE, H. G.; MELIDO, R. C. N.; LOPES, H. N. S.; SOUZA, F. C. Eucalypt growth in monoculture and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements. **Agroforestry Systems**, v. 87, n. 6, p. 1295–1307, 2013.

- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Condicionamento Climático da Produtividade Potencial. In: **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.
- PERONE, A.; LOMBARDI, F.; MARCHETTI, M.; TOGNETTI, R.; LASSERRE, B. Evidence of solar activity and El Niño signals in tree rings of *Araucaria araucana* and *A. angustifolia* in South America. **Global and Planetary Change**, v. 145, p. 1–10, 2016.
- PODESTÁ, G. P.; MESSINA, C. D.; GRONDONA, M. O.; MAGRIN, G. O. Associations between Grain Crop Yields in Central-Eastern Argentina and El Niño–Southern Oscillation. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, n. 10, p. 1488–1498, 1999.
- PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society Science Australian**, v. 64, p. 114–118, 1940.
- PROPASTIN, P.; FOTSO, L.; KAPPAS, M. Assessment of vegetation vulnerability to ENSO warm events over Africa. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12, n. SUPPL. 1, p. 83–89, 2010.
- REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 307–326, 2016.
- REZENDE, M. A.; FERRAZ, E. S. B. Incrementos anuais de volume, massa e idade ideal de corte para *Eucalyptus grandis*. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, n. 32, p. 43–48, 1986.
- RIBEIRO, A.; PAIVA, Y. G.; BAESSO, R. C. E.; ALMEIDA, A. Q. de; OLIVEIRA, A. S. de; OLIVEIRA, R. A. de; HAMAKAWA, P. J.; SILVA, M. P. Eucalipto. In: **Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. 1. ed. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, p. 407–423, 2009.
- RODRÍGUEZ, R.; MABRES, A.; LUCKMAN, B.; EVANS, M.; MASIOKAS, M.; EKTVEDT, T. M. “El Niño” events recorded in dry-forest species of the lowlands of northwest Peru. **Dendrochronologia**, v. 22, n. 3, p. 181–186, 2005.
- ROLIM, S. G.; JESUS, R. M.; NASCIMENTO, H. E. M.; DO COUTO, H. T. Z.; CHAMBERS, J. Q. Biomass change in an Atlantic tropical moist forest: The ENSO effect in permanent sample plots over a 22-year period. **Oecologia**, v. 142, n. 2, p. 238–246, 2005.
- SANDS, P. J.; LANDSBERG, J. J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, v. 163, n. 1, p. 273–292, 2002.
- SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and

- nonpoint sources. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 37, n. 5, p. 1169–1188, 2001.
- SMITH, R.; RENTON, M.; REID, N. Growth and carbon sequestration by remnant *Eucalyptus camaldulensis* woodlands in semi-arid Australia during La Niña conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 704–710, 2017.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M. de A.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684–1694, 2010.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 981p.
- THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. 1. ed. Centerton: Laboratory of Climatology, 1955.
- WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. International Geophysics Series, 2ed., v. 14, 2006. 627p.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 1, p. 184–194, 1981.
- XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, p. 1–6, 2015. Disponível em: <<https://utexas.app.box.com/v/xavier-et-al-ijoc-data>>.

APÊNDICES

APÊNDICE A. Variação anual de incremento corrente anual potencial (ICA_{PP}), atingível (ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual ($Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone A1 (*E. urophylla* x *sp.*).

Figura A. 1. Aracruz, ES.

Figura A. 2. Arapoti, PR.

Figura A. 3. Borebi, SP.

Figura A. 4. Chapadão do Sul, MS.

Figura A. 5. Peixe, TO.

Figura A. 6. Urbano Santos, MA.

APÊNDICE B. Variação anual de incremento corrente anual potencial (ICA_{PP}), atingível (ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual ($Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) no 3º ano do ciclo do eucalipto, clone C3 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*).

Figura B. 1. Aracruz, ES.

Figura B. 2. Arapoti, PR.

Figura B. 3. Borebi, SP.

Figura B. 4. Chapadão do Sul, MS.

Figura B. 5. Guanhães, MG.

Figura B. 6. Inhambupe, BA.

Figura B. 7. Monte Dourado, PA.

Figura B. 8. Niquelândia, GO.

Figura B. 9. Otacílio Costa, SC.

Figura B. 10. Peixe, TO.

Figura B. 11. São Gabriel, RS.

Figura B. 12. Urbano Santos, MA.

APÊNDICE C. Porcentagem de anos de El Niño, La Niña e Neutros com incremento corrente anual potencial (ICA_{PP}), atingível (ICA_{PA}) e quebra de incremento corrente anual ($Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$) abaixo, acima e dentro do Intervalo da Variação Interquartil (IQR).

Tabela C. 1. Incremento corrente anual potencial (ICA_{PP}).

Local	Clone	El Niño			La Niña			Neutro		
		Acima	Dentro	Abaixo	Acima	Dentro	Abaixo	Acima	Dentro	Abaixo
ARC	A1	45,5	45,5	9,1	16,7	50,0	33,3	10,0	60,0	30,0
ARP	A1	9,1	54,5	36,4	41,7	58,3	0,0	20,0	40,0	40,0
BOR	A1	45,5	27,3	27,3	25,0	58,3	16,7	0,0	70,0	30,0
CPS	A1	18,2	54,5	27,3	33,3	41,7	25,0	20,0	60,0	20,0
GNS	A1	36,4	36,4	27,3	25,0	58,3	16,7	10,0	60,0	30,0
INP	A1	18,2	63,6	18,2	16,7	50,0	33,3	40,0	40,0	20,0
MDR	A1	45,5	27,3	27,3	8,3	58,3	33,3	20,0	70,0	10,0
NQL	A1	36,4	45,5	18,2	25,0	58,3	16,7	10,0	50,0	40,0
OTC	A1	27,3	45,5	27,3	25,0	50,0	25,0	20,0	60,0	20,0
PEX	A1	45,5	36,4	18,2	8,3	75,0	16,7	20,0	40,0	40,0
SGB	A1	27,3	45,5	27,3	25,0	41,7	33,3	20,0	70,0	10,0
UBS	A1	45,5	36,4	18,2	8,3	75,0	16,7	20,0	40,0	40,0
ARC	C3	45,5	45,5	9,1	16,7	50,0	33,3	10,0	60,0	30,0
ARP	C3	9,1	72,7	18,2	41,7	50,0	8,3	20,0	30,0	50,0
BOR	C3	36,4	36,4	27,3	33,3	41,7	25,0	0,0	80,0	20,0
CPS	C3	18,2	54,5	27,3	33,3	41,7	25,0	20,0	60,0	20,0
GNS	C3	36,4	36,4	27,3	25,0	58,3	16,7	10,0	60,0	30,0
INP	C3	18,2	63,6	18,2	16,7	50,0	33,3	40,0	40,0	20,0
MDR	C3	45,5	27,3	27,3	8,3	58,3	33,3	20,0	70,0	10,0
NQL	C3	36,4	45,5	18,2	25,0	58,3	16,7	10,0	50,0	40,0
OTC	C3	18,2	54,5	27,3	25,0	58,3	16,7	30,0	40,0	30,0
PEX	C3	45,5	36,4	18,2	8,3	75,0	16,7	20,0	40,0	40,0
SGB	C3	18,2	45,5	36,4	25,0	58,3	16,7	30,0	50,0	20,0
UBS	C3	45,5	36,4	18,2	8,3	75,0	16,7	20,0	40,0	40,0

ARC: Aracruz-ES, ARP: Arapoti-PR, BOR: Borebi-SP, CPS: Chapadão do Sul-MS, GNS: Guanhães-MG, INP: Inhambuê-BA, MDR: Monte Dourado-PA, NQL: Niquelândia-GO, OTC: Otacílio Costa-SC, PEX: Peixe-TO, SGB: São Gabriel-RS e UBS: Urbano Santos-MA.

Tabela C. 2. Incremento corrente anual atingível (ICA_{PA}).

Local	Clone	El Niño			La Niña			Neutro		
		Acima	Dentro	Abaixo	Acima	Dentro	Abaixo	Acima	Dentro	Abaixo
ARC	A1	18,2	45,5	36,4	33,3	58,3	8,3	20,0	50,0	30,0
ARP	A1	27,3	45,5	27,3	41,7	50,0	8,3	0,0	60,0	40,0
BOR	A1	27,3	45,5	27,3	8,3	66,7	25,0	40,0	40,0	20,0
CPS	A1	27,3	45,5	27,3	8,3	75,0	16,7	40,0	30,0	30,0
GNS	A1	36,4	45,5	18,2	25,0	50,0	25,0	10,0	60,0	30,0
INP	A1	9,1	72,7	18,2	25,0	41,7	33,3	40,0	40,0	20,0
MDR	A1	18,2	36,4	45,5	25,0	58,3	16,7	30,0	60,0	10,0
NQL	A1	18,2	45,5	36,4	8,3	66,7	25,0	50,0	40,0	10,0
OTC	A1	18,2	54,5	27,3	33,3	50,0	16,7	20,0	50,0	30,0
PEX	A1	18,2	72,7	9,1	25,0	41,7	33,3	30,0	40,0	30,0
SGB	A1	45,5	54,5	0,0	8,3	33,3	58,3	20,0	70,0	10,0
UBS	A1	18,2	63,6	18,2	25,0	50,0	25,0	30,0	40,0	30,0
ARC	C3	18,2	45,5	36,4	33,3	58,3	8,3	20,0	50,0	30,0
ARP	C3	27,3	45,5	27,3	25,0	58,3	16,7	20,0	50,0	30,0
BOR	C3	27,3	36,4	36,4	8,3	75,0	16,7	40,0	40,0	20,0
CPS	C3	27,3	45,5	27,3	8,3	75,0	16,7	40,0	30,0	30,0
GNS	C3	27,3	45,5	27,3	16,7	58,3	25,0	30,0	50,0	20,0
INP	C3	18,2	63,6	18,2	25,0	41,7	33,3	30,0	50,0	20,0
MDR	C3	9,1	54,5	36,4	25,0	50,0	25,0	40,0	50,0	10,0
NQL	C3	18,2	45,5	36,4	8,3	66,7	25,0	50,0	40,0	10,0
OTC	C3	27,3	54,5	18,2	33,3	33,3	33,3	10,0	70,0	20,0
PEX	C3	18,2	72,7	9,1	8,3	50,0	41,7	50,0	30,0	20,0
SGB	C3	54,5	45,5	0,0	8,3	50,0	41,7	10,0	60,0	30,0
UBS	C3	36,4	45,5	18,2	8,3	66,7	25,0	30,0	40,0	30,0

ARC: Aracruz-ES, ARP: Arapoti-PR, BOR: Borebi-SP, CPS: Chapadão do Sul-MS, GNS: Guanhões-MG, INP: Inhambupe-BA, MDR: Monte Dourado-PA, NQL: Niquelândia-GO, OTC: Otacílio Costa-SC, PEX: Peixe-TO, SGB: São Gabriel-RS e UBS: Urbano Santos-MA.

Tabela C. 3. Quebra de incremento corrente anual ($Q_{ICA} = ICA_{PP} - ICA_{PA}$).

Local	Clone	El Niño			La Niña			Neutro		
		Acima	Dentro	Abaixo	Acima	Dentro	Abaixo	Acima	Dentro	Abaixo
ARC	A1	36,4	45,5	18,2	8,3	58,3	33,3	30,0	50,0	20,0
ARP	A1	18,2	36,4	45,5	25,0	66,7	8,3	30,0	50,0	20,0
BOR	A1	27,3	36,4	36,4	33,3	58,3	8,3	10,0	60,0	30,0
CPS	A1	18,2	54,5	27,3	25,0	66,7	8,3	30,0	30,0	40,0
GNS	A1	18,2	54,5	27,3	25,0	58,3	16,7	30,0	40,0	30,0
INP	A1	18,2	72,7	9,1	33,3	41,7	25,0	20,0	40,0	40,0
MDR	A1	36,4	54,5	9,1	16,7	58,3	25,0	20,0	40,0	40,0
NQL	A1	27,3	63,6	9,1	33,3	50,0	16,7	10,0	40,0	50,0
OTC	A1	9,1	45,5	45,5	16,7	58,3	25,0	50,0	50,0	0,0
PEX	A1	27,3	63,6	9,1	25,0	58,3	16,7	20,0	30,0	50,0
SGB	A1	9,1	36,4	54,5	58,3	33,3	8,3	0,0	90,0	10,0
UBS	A1	27,3	54,5	18,2	25,0	50,0	25,0	20,0	50,0	30,0
ARC	C3	36,4	45,5	18,2	8,3	58,3	33,3	30,0	50,0	20,0
ARP	C3	18,2	36,4	45,5	33,3	58,3	8,3	20,0	60,0	20,0
BOR	C3	27,3	36,4	36,4	33,3	58,3	8,3	10,0	60,0	30,0
CPS	C3	18,2	54,5	27,3	33,3	58,3	8,3	20,0	40,0	40,0
GNS	C3	27,3	36,4	36,4	25,0	66,7	8,3	20,0	50,0	30,0
INP	C3	18,2	63,6	18,2	25,0	50,0	25,0	30,0	40,0	30,0
MDR	C3	27,3	63,6	9,1	16,7	58,3	25,0	30,0	30,0	40,0
NQL	C3	27,3	54,5	18,2	33,3	50,0	16,7	10,0	50,0	40,0
OTC	C3	9,1	45,5	45,5	16,7	58,3	25,0	50,0	50,0	0,0
PEX	C3	18,2	63,6	18,2	33,3	50,0	16,7	20,0	40,0	40,0
SGB	C3	0,0	45,5	54,5	50,0	41,7	8,3	20,0	70,0	10,0
UBS	C3	27,3	54,5	18,2	25,0	50,0	25,0	20,0	50,0	30,0

ARC: Aracruz-ES, ARP: Arapoti-PR, BOR: Borebi-SP, CPS: Chapadão do Sul-MS, GNS: Guanhães-MG, INP: Inhambupe-BA, MDR: Monte Dourado-PA, NQL: Niquelândia-GO, OTC: Otacílio Costa-SC, PEX: Peixe-TO, SGB: São Gabriel-RS e UBS: Urbano Santos-MA.