

**MARCIEL LELIS DUARTE**

**INFLUÊNCIA DE EVENTOS DE EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL E A  
PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO NO BRASIL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Aristides Ribeiro

Coorientadores: Hélio Garcia Leite  
Mariana Rodrigues Magalhães

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

Duarte, Marciel Lelis, 1989-

D812i  
2020

Influência de eventos de El Niño Oscilação Sul e a  
produtividade do eucalipto no Brasil / Marciel Lelis Duarte. –  
Viçosa, MG, 2020.

57 f. : il. ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Aristides Ribeiro.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Agrossilvicultura. 2. Mudanças climáticas.  
3. Ecofisiologia vegetal - Modelos matemáticos. I. Universidade  
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.  
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada.  
II. Título.

CDD 22. ed. 630.2815

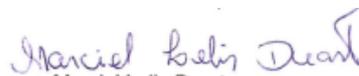
**MARCIEL LELIS DUARTE**

**INFLUÊNCIA DE EVENTOS DE EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL E A  
PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO NO BRASIL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 05 de novembro de 2020.

Assentimento:



---

Marciel Lelis Duarte  
Autor



---

Aristides Ribeiro  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

Ao Grande Espírito e o Divino Pai Eterno, que me presenteou com a força e a coragem necessária para trilhar mais este percurso.

À minha mãe, Eunice, pelo encorajamento e amor incondicional, sem a qual nada seria possível.

Meu irmão Roniel pela ajuda, apoio, amizade em todos os momentos de minha vida

Ao meu vô João (in memoria) pelos ensinamentos, amizade que irei levar comigo por toda a vida.

Ao professor Aristides, pela orientação, ensinamentos e amizade.

A Mariana e o professor Hélio pela coorientação, ensinamentos e amizade.

À toda minha família, que mesmo longe, sempre me apoiou com muito carinho.

Aos sempre amigos, que sempre me ajudaram e me escutaram sempre que precisei.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, por serem sempre tão prestativos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

*“O único lugar aonde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”.*

(Albert Einstein)

## RESUMO

DUARTE, Marciel Lelis, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2020. **Influência de eventos de El Niño Oscilação Sul e a produtividade do eucalipto no Brasil.** Orientador: Aristides Ribeiro. Coorientadores: Hélio Garcia e Mariana Rodrigues Magalhães.

As variações nos padrões climáticos globais são principalmente determinadas por alterações na circulação de grande escala. Os eventos conhecidos com El Niño e La Niña (ENOS) estão relacionados as anomalias na temperatura da superfície do oceano Pacífico Equatorial e determinados pelo Índice de Oscilação Sul (IOS). Durante eventos ENOS o território Brasileiro sofre importante alteração no padrão climático, com destaque para a precipitação, com padrões mais bem definidos nas regiões Sul e Nordeste do país. Recentes estudos apontam que as mudanças climáticas se manifestam majoritariamente por alterações na frequência e intensidade dos evento ENOS, sendo este indicados como principal driving force. Assim estudos de possíveis alterações na produtividade de culturas devem focar na dinâmica atmosférica durante estes eventos. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña na produtividade simulada pelo modelo Physiological Processes Predicting Growth (3-PG) e pelas Redes Neurais Artificiais (RNA) em *Eucalyptus spp.* Este trabalho foi desenvolvido nas principais áreas de plantio comerciais de eucalipto no Brasil, localizadas nos Estados da Bahia (BA), Minas Gerais (MG) e Rio Grande do Sul (RS). Trabalhou-se nos anos de ocorrência dos eventos El Niño e La Niña com intensidades fraca, moderada e forte da década de 1980 até 2015. Realizou-se a simulação das variáveis que expressam produtividade nos plantios em cada ano destes eventos climáticos, utilizando o modelo 3-PG e as RNA. Para o modelo 3-PG a calibração do modelo foi feita a partir de dados de inventários florestais. As idades de três, cinco e sete anos foram avaliadas ao longo do ciclo. As médias dos estados, regiões e idades foram comparadas estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p \leq 5\%$ ). As estimativas realizadas pelo modelo 3PG apresentaram bons resultados, sendo as regiões do estado de MG o que apresentou melhores estimativas ( $R^2=0.85$ ). O modelo foi capaz de detectar tendências atribuídas aos eventos climáticos do El Niño e La Niña, evidenciando maiores incrementos volumétricos naqueles que apresentaram maiores totais chuvas. Na região produtora do RS os anos de El Niño moderado e La Niña moderado favoreceram a produtividade do eucalipto nas três regiões e idades analisadas. Na região da BA os anos de La Niña fraco e de El Niño forte prejudicaram a produtividade do eucalipto em todas as regiões

e idades estudadas. Com uma produtividade média 37% menor, foram selecionadas as 12 melhores redes, as quais apresentaram maior  $r_{yy}$  na validação. As RNAs foram obtidas com o algoritmo de treinamento Resilient Propagation (RPROP+), utilizando a função logística, tanto na camada oculta (8 neurônios) como na de entrada. Os melhores resultados de  $r_{yy}$  e REQM (%) foram obtidos utilizando 90% dos dados para o treinamento nas redes RNA 60, RNA 68, RNA 24, RNA 19; 85% para as redes RNA 29, RNA 83, RNA 89; 80% para a rede RNA 69 e 70% para RNA 70 e 54. A utilização de RNA possibilita a estimação do IMA6 de povoamentos de eucalipto através de variáveis climáticas com boa precisão, apesar da complexidade dos dados, incluindo muitas variáveis. Entre as variáveis explicativas que possuem maior importância para a estimação da produtividade do eucalipto ao final da rotação, destacam-se os veranicos e fenômenos *El nino* e *La nina*.

Palavras-chave: ENOS; Mudanças climáticas; Modelagem ecofisiológica; Silvicultura.

## ABSTRACT

DUARTE, Marciel Lelis, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2019. **Influence of El Niño South Oscillation events and eucalyptus productivity in Brazil.** Adviser: Aristides Ribeiro. Co-advisers: Hélio Garcia and Mariana Rodrigues Magalhães.

Among the climatic forces that most influence large-scale circulation, in the Earth's atmosphere is El Niño and La Niña. The climatology of precipitation during ENOS events shows that Brazil is influenced by this phenomenon that determines the different climatic conditions, especially the volume of rain in the South and Northeast regions of the country, where this pattern is better defined. The objective of the study is to evaluate the influence of the climatic phenomena El Niño and La Niña on the productivity simulated by the Physiological Processes Predicting Growth (3-PG) model and by Artificial Neural Networks (RNA) in Eucalyptus spp. This work was carried out in the main commercial eucalyptus plantation areas in Brazil, located in the States of Bahia (BA), Minas Gerais (MG) and Rio Grande do Sul (RS). The years of occurrence of the events El Niño and La Niña were worked on with weak, moderate and strong intensities from the 1980s to 2015. A simulation of the variables that express planting productivity in each year of these climatic events was carried out, using the model 3-PG and RNA. For the 3-PG model, the calibration of the model was made from forest inventory data. The ages of three, five and seven years were assessed throughout the cycle. The averages of states, regions and ages were statistically compared using the Tukey test ( $p \leq 5\%$ ). The estimates made by the 3PG model showed good results, with the regions of the state of MG having the best estimates ( $R^2 = 0.85$ ). The model was able to detect trends attributed to the climatic events of El Niño and La Niña, showing greater volumetric increases in those that presented greater total rainfall. In the RS producing region, the years of moderate El Niño and moderate La Niña favored eucalyptus productivity in the three regions and ages analyzed. In the BA region, the weak La Niña and strong El Niño years affected eucalyptus productivity in all regions and ages studied. With an average productivity 37% lower. the 12 best networks were selected, which presented the highest  $\hat{r}y$  in the validation. The ANNs were obtained with the training algorithm Resilient Propagation (RPROP +), using the logistic function, both in the hidden layer (8 neurons) and in the input layer. The best results of  $\hat{r}y$  and REQM (%) were obtained using 90% of the data for training in networks RNA 60, RNA 68, RNA 24, RNA 19; 85% for RNA 29, RNA 83, RNA 89 networks; 80% for the RNA 69 network and 70% for the RNA 70 and 54. The use of RNA

makes it possible to estimate the IMA6 of eucalyptus stands through climatic variables with good precision, despite the complexity of the data, including many variables. Among the explanatory variables that are most important for the estimation of eucalyptus productivity at the end of the rotation, the summer and El nino and La nina phenomena stand out.

Keywords: ENSO, Climate changes; Ecophysiological modeling; Forestry.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	10
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
CAPÍTULO 1 - INFLUÊNCIA DO EL NIÑO E LA NIÑA NA PRODUTIVIDADE DE PLANTIOS DE EUCALIPTO EM DISTINTAS REGIÕES NO BRASIL .....	21
1. Introdução .....	21
2. Material e métodos .....	23
3. Resultados e discussão.....	26
4. Conclusões .....	33
5. Referências bibliográficas.....	34
CAPÍTULO 2 - MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE EUCALIPTO USANDO REDES NEURONAIAS ARTIFICIAIS E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE ADVERSIDADE CLIMÁTICAS.....	37
1. Introdução .....	37
2. Material e métodos .....	38
3. Resultados e discussão.....	44
4. Conclusão.....	49
5. Referências bibliográficas.....	49
ANEXOS.....	52

## 1. INTRODUÇÃO

As florestas plantadas desempenham um importante papel ambiental no suprimento da demanda por madeira, pois reduzem a pressão sobre a exploração das florestas naturais (Cook *et al.*, 2016; Fao, 2015). Dentre as espécies cultivadas, o gênero *Eucalyptus* se destaca, possuindo uma área de mais de 20 milhões de hectares plantados em todo mundo (Wei & Xu, 2003; Booth, 2013; Cook *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017). O rápido crescimento das áreas de plantio e o ganho crescente da produtividade é resultado dos investimentos em pesquisas e a aplicação dos resultados no manejo silvicultural e no melhoramento genético das florestas (Stape *et al.*, 2010; Booth, 2013; Rubilar *et al.*, 2018).

A área de cultivo florestal no Brasil totaliza cerca de 9 milhões de hectares, sendo que 6,97 milhões são plantios do gênero *Eucalyptus* (Iba, 2020). O setor florestal tem grande importância na economia brasileira, gerando em tributos e comercialização de produtos aproximadamente R\$ 13 bilhões e empregando de forma direta e indireta cerca de 3,75 milhões de pessoas (Iba, 2020).

Os plantios florestais brasileiros se destacam pelo rápido crescimento, homogeneidade do material, alta produtividade (35,7 m<sup>3</sup>/ha/ano) e ciclos mais curtos de 5 a 9 anos (Iba, 2012). O clima favorável, as condições do solo, além de investimentos contínuos das empresas contribuem para o bom desenvolvimento das florestas plantadas (Lemos, 2012; Booth, 2013; Christina *et al.*, 2015; Campoe *et al.*, 2016).

Existem várias áreas marginais no Brasil, que não são adequadas a produção de grãos, e que podem ser exploradas economicamente com o cultivo do Eucalipto. No entanto, à falta de conhecimento relativo ao potencial produtivo das florestas nestes locais faz com que não haja investimentos.

Entre os fatores considerados pelas empresas para a expansão dos plantios florestais estão o preço das terras, a topografia, restrições legais, condições edafoclimáticas, dentre outros, que possam indicar os melhores níveis de produtividade das espécies de interesse a serem plantadas (Rascon, 2012).

A disponibilidade hídrica é um dos principais fatores limitantes à produtividade florestal. Borges (2012) identificou em seus estudos sobre condições climáticas de diferentes regiões do Brasil, que a produtividade potencial do eucalipto aos seis anos de idade é influenciada pela precipitação pluviométrica, radiação solar, distribuição de chuvas e temperatura máxima.

A precipitação e a temperatura do ar destacam como sendo as variáveis climáticas com maior influência sobre a produtividade de diversas espécies arbóreas de clima tropical (Martinkoski *et al.* 2015). Segundo estudos realizados por Oliveira *et al.* (2011), quanto maior o volume de chuvas durante a estação de crescimento, maiores serão os ganhos de incremento pelas as árvores.

Sette *et al.* (2010) observaram que existe uma relação entre o período de máximo crescimento do eucalipto e altos níveis de precipitação e temperatura, disponibilidade de água no solo, horas de luz/dia, e aumento da taxa fotossintética. Resultados semelhantes foram encontrados por Otto *et al.* (2013), que ao estudar a fotossíntese e a produtividade de quatro clones de *Eucalyptus*, verificaram um crescimento 3,3 vezes maior no plantio localizado em área com precipitação bem distribuída ao longo do ano, quando comparados ao localizados na área onde a precipitação se concentrava nos meses mais quentes.

A temperatura tem influência nos processos fisiológicos das plantas, afetando a fotossíntese, respiração, permeabilidade da parede celular, absorção de água e nutrientes, transpiração, atividade enzimática e coagulação de proteínas (Meurer, 2007).

Exposição a excessos térmico durante a estação de crescimento podem limitar a produção de enzimas e hormônios que são necessários para que determinados processos fisiológicos ocorram, afetando assim o crescimento e desenvolvimento das plantas (Martinkoski *et al.*, 2015). Altas temperaturas tendem a reduzir o ganho líquido de carbono devido ao aumento da fotorrespiração, além disso, temperaturas mais altas geralmente estão relacionadas com o fechamento dos estomático, o que ocasiona a diminuição da fotossíntese, devido ao menor influxo de CO<sub>2</sub>, ocasionando redução na produtividade (Damatta *et al.* 2010).

A análise de causalidade nas mudanças climáticas é muito desafiadora e apresenta ainda grande incertezas. Recentemente, Wang *et al.* (2017) trazem evidências que as principais forças motrizes das mudanças climáticas têm ciclos de 3,36 e 22,6 anos. Pela periodicidade atribui-se estarem relacionados respectivamente ao ENOS e ao ciclo de Hale de manchas solares, sendo o primeiro o ciclo de maior significância. Isso justifica o objeto da tese em estudar padrões climáticos típicos dos ciclos de El Niño (El Niño–Southern Oscillation cycle) e pelo fato do planejamento de plantios comerciais de eucalipto abranger três ciclos da cultura (ciclos 7 de anos.)

Anomalias positivas e negativas da temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico associadas aos episódios *El Niño* e *La Niña* produzem circulações anômalas de grande escala na atmosfera, gerando impactos significativos no clima da região do Atlântico e da América do Sul (Aceituno 1988; Fontana e Berlato, 1996; Coelho e Ambrizzi, 2000; Grimm *et*

al. 2000; Puchalski, 2000; Grimm, 2004, Grimm e Tedeschi, 2004; Cera e Ferraz, 2015). Marengo (2006) observou, para o período de 1979-2000, reduções na precipitação, no escoamento e na convergência de umidade em anos de *El Niño*, e aumentos destas variáveis em anos de *La Niña*.

No Brasil, o sinal do ENOS se dá, principalmente, por anomalias climáticas de precipitação pluviométrica e a temperatura do ar das regiões Sul e Nordeste (Grimm et al., 2000; Fontana e Berlato, 1997; Oliveira e Satyamurty, 1998; Marengo e Oliveira, 1998; DIAZ et al., 1998; Puchalski, 2000; Berlato & Fontana, 2003).

Na década de 90, quatro estiagens associadas ao *La Niña* causaram perdas de 13,8 milhões de toneladas de grãos no Rio Grande do Sul (Cunha, 1998, Fontana & Almeida, 2000). Quanto ao efeito sobre a temperatura do ar, Puchalski (2000) mostrou que em anos de *La Niña* a temperatura média é inferior à normal em praticamente todos os meses do ano. Posteriormente, Lopes & Berlato (2001) constataram que o efeito sobre a temperatura média ocorre como consequência da diminuição da temperatura mínima em todos os meses do ano, mas com maior intensidade nos meses de outubro e novembro.

Grimm e Tedeschi (2004) mostram que, em episódios *La Niña*, o número de eventos extremos de precipitação tende a aumentar no centro-sudeste do Brasil, especialmente em outubro e novembro do ano de início do fenômeno, ocorrendo diminuição expressiva em janeiro. Já Coelho e Ambrizzi (2000), relatam que o sudoeste da região Sudeste do Brasil e o sul da Bahia são marcadas por anomalias positivas de precipitação observadas de dezembro a maio.

De acordo com Minuzzi et al., 2005, os eventos de *El Niño* 1982/83 e 1997/98 foram os de maior influência em algumas regiões do estado de Minas Gerais. Os autores relatam que, o primeiro evento ocasionou anomalias acima da média, principalmente na região sudoeste do estado, enquanto o outro originou chuvas abaixo da média na região nordeste. As estiagens, ocasionadas pelo fenômeno climático no norte-nordeste de Minas Gerais, são devidas a períodos superiores a 15 dias e, no sul-sudoeste, aos veranicos com duração de três a seis dias.

A avaliação dos efeitos do *El Niño* e *La Niña* pode fornecer subsídios importantes para o desenvolvimento de políticas e estratégias para minimizar os impactos negativos e tirar vantagem dos positivos, especialmente para a agricultura e silvicultura (Fontanna et al., 2002).

Modelos numéricos de simulação são ferramentas úteis para redução do tempo e do custo da experimentação de campo. Uma das vantagens da utilização de modelos na resolução de problemas está na capacidade destes em estimar valores do sistema que representa. Devido à complexidade do crescimento e desenvolvimento dos vegetais, o modelo não considera a

totalidade dos processos e variáveis envolvidas no crescimento das culturas, ou seja, o modelo é uma simplificação da realidade.

O modelo de crescimento 3-PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*), que é baseado em processos ecofisiológicos, utiliza princípios fisiológicos para estimar a produtividade florestal em plantios equiâneos e monoespecíficos. Este modelo necessita de poucos ajustes para se obter uma estimativa realista do crescimento florestal e, também, pode ser facilmente parametrizado para um tipo definido de floresta plantada (Landsberg e Waring, 1997).

Os modelos ecofisiológicos baseiam-se na descrição da floresta em compartimentos (raízes, tronco, ramos e folhas), visando prever a produção como resultado dos processos de crescimento da planta. Dentre estes processos destacam-se: transpiração, fotossíntese, respiração, alocação de material fotossintético e ciclagem de nutrientes (Reffye *et al.*, 1999). Assim, os modelos ecofisiológicos baseiam-se nos processos vitais para o crescimento das árvores (aspectos lumínicos, térmicos, hídricos, nutricionais e biológicos), descrevendo a produção de fotossintetizados, ou carbono, da floresta sob influência do ambiente e dos processos ecológicos (Landsberg e Gower, 1997).

Uma das vantagens do modelo 3PG é permitir o acompanhamento do desenvolvimento de variáveis de importância para o gerenciamento florestal, (por exemplo, o índice de área foliar - IAF), em nível de região devido à possibilidade de sua alimentação com dados climáticos gerados de forma contínua pelas estações meteorológicas espalhadas em campo (Rascon, 2012).

O desempenho do 3-PG em estimar a produtividade de florestas comerciais de eucalipto no Brasil, tem sido avaliado a partir de dados obtidos em plantios de empresas florestais situadas nos Estados da Bahia (Stape, 2002; Stape *et al.*, 2004), Espírito Santo (Almeida *et al.*, 2003; Almeida *et al.*, 2004a,b) e região Centro-Leste de Minas Gerais (Silva, 2006), na região oeste de Minas Gerais (Tsukamoto filho *et al.*, 2004), na região de Curvelo e Itacambira em Minas Gerais (Borges, 2009), entre o norte do Espírito Santo e Sul da Bahia (Baesso *et al.*, 2010), e na região do Guaíba no Rio Grande do Sul (Londero, 2010).

Para a modelagem envolvendo inúmeras variáveis, inclusive categóricas, com relações não-lineares e complexas, têm sido utilizadas redes neurais artificiais (RNAs). São diversas as aplicações das RNAs na área florestal, como classificação e mapeamento das florestas, modelagem do crescimento florestal, análise de dados espaciais, e mudança climática (Hilbert e Ostendorf, 2001; Ozçelik *et al.*, 2010; Leite *et al.*, 2011; Hickey *et al.*, 2015; Binoti *et al.*, 2015; Bhering *et al.*, 2015; Silva Ribeiro *et al.*, 2016; Campos *et al.*, 2016; Martins *et al.*, 2016; Vahedi, 2017).

A RNA é um sistema computacional paralelo composto por vários elementos de processamento simples, conhecidos como neurônios artificiais, que se conectam entre si de uma maneira específica para executar uma determinada tarefa (Bullinaria, 2014). As conexões dos neurônios estão associadas a pesos, e o ajuste deles é realizado por um processo chamado treinamento, que é responsável pela extração das características dos dados e armazenamento de conhecimento das redes (Binoti, 2012).

As RNA são mais precisas que outras técnicas estatísticas, particularmente quando o problema abordado é complexo ou mal compreendido, não exigem conhecimento prévio do processo a ser modelado ou da função alvo, e podem ser incluídas inúmeras variáveis quantitativas e qualitativas, características que as tornam uma ferramenta muito flexível e poderosa (Peng e Wen, 1999).

Nesse contexto, é importante entender o impacto das mudanças nos padrões climáticos atuais na produtividade do eucalipto no Brasil. Estudos desses padrões permitem aprimorar o zonamento silvicultural definindo com maior precisão o potencial das diferentes áreas sendo útil tanto ao setor público quanto privado. O conhecimento desses impactos não atende apenas ao planejamento da atividade, mas serve como ferramenta para tomada de decisão visando a mitigação, por permitir melhorias na implantação dos cultivos e no manejo das florestas.

## 2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aceituno, P. 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector: Part I. surface climate. *Monthly Weather Review*, 166: 505–524, 1988.

Almeida, A.; Landsberg, L. & Sands, P.J. 2004a. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. *Forest Ecology and Management* 193: 179–195. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.029>

Almeida, a.c.; landsberg, J.J.; Sands, P.J.; Ambrogi, M.S.; Fonseca, S.; Barddal, S.M. & Bertolucci, F.L. 2004b. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in fast growing *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology Management*, 193:167–177. : <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.044>

Almeida, A.C.; Maestri, R.; Landsberg, J.J. & Scolforo, J.R.S. 2003. Linking process-based and empirical forest models in *Eucalyptus* plantations in Brazil. In: Amaro, A.; Tomé, M. (Eds.), *Modelling Forest Systems*. CABI, Wallingford, UK, p.63–74.

Baesso, R.C.; Ribeiro, A.; Silva, M.P. 2010. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 335-344. <https://doi.org/10.5902/198050981856>

Berlato, m.a.; Fontana, d.c. 2003. El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; Aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: UFRGS. 110p.

Bhering, l. L.; cruz, c. D.; peixoto, l. D. A.; rosado, a. M.; laviola, b. G.; nascimento, m. Application of neural networks to predict volume in eucalyptus. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.15, n.3, p.125-131, 2015.

Binoti, M.L.M.S. 2012. Emprego de redes neurais artificiais em mensuração e manejo florestal. 2012. 130 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa.

Binoti, M.L.M.S.; Leite, H.G.; Binoti, D.H.B.; Gleriani, J.M. 2015. Prognose em nível de povoamento de clones de eucalipto empregando redes neurais artificiais. *Cerne*, v. 21, n. 1, p. 97-105. <https://doi.org/10.1590/01047760201521011153>

Booth, T. H. *Eucalypt plantations and climate change. Forest Ecology and Management*, v. 301, p. 28-34, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.004>

Borges, J.S. 2009. Parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. 2009. 77 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Borges, J.S. 2012. Modulador edáfico para uso em modelo ecofisiológico e produtividade potencial de povoamentos de eucalipto. 70f. 2012. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa.

Bullinaria, J. A. **Introduction to Neuronal Computation**. Notas de aula. 2014. Disponível em: <<http://www.cs.bham.ac.uk/~jxb/inc.html>>. Acesso em: 27 de fevereiro de 2020.

Campoe, O. C.; Munhoz, J. S. B.; Alvares, C. A.; Carneiro, R. L.; De Mattos, E. M.; Ferez, A. P. C.; Stape, J. L. 2016. Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 380, p. 149-160. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.048>

Campos, B. P. F.; Da silva, G. F.; Binoti, D. H. B.; De Mendonça, A. R.; Leite, H. G. 2016. Predição da altura total de árvores em plantios de diferentes espécies por meio de redes neurais artificiais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v.3, n.88, p.375-385. <http://dx.doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.1166>

Cera, J.C.; Ferraz, S. E.T. 2015. Variações climáticas na precipitação no Sul do Brasil no clima presente e futuro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, n. 1, 81 - 88. <https://doi.org/10.1590/0102-778620130588>

Christina, M.; Le maire, G.; Battie-laclau, P.; Nouvellon, Y.; Bouillet, J.-P.; Jourdan, C.; Gonçalves, J. L. D. M.; Laclau, J.-P. 2015. Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. *Global change biology*, v. 21, n. 5, p. 2022-2039.

Coelho, C.A.S.; Ambrizzi, T. Determinação dos padrões de precipitação sobre a América do Sul em associação a TSM da Bacia do Pacífico equatorial durante períodos extremos de ENOS através da utilização de técnicas estatísticas multivariadas. In: congresso brasileiro de meteorologia, 11, 2000, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: SBMET, 2000. 1 CD-ROM.

Cook, R. L.; Binkley, D.; Stape, J. L. 2016. *Eucalyptus* plantation effects on soil carbon after 20 years and three rotations in Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 359, p. 92-98.

Cunha, G.R. Esperando La Niña. *Revista Plantio Direto*, 46:22-23, 1998.

Damatta, F. M.; Grandis, A.; Arenque, B. C.; Buckeridge, M. S. 2010. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. *Food Research International*, v.43, n.7, p.1814-1823.

Fao. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: State of the world's forest, 2015, p.126.

Fontana, D.C.; Berlato, M.A. 1996. Relação entre El Niño Oscilação Sul (ENOS), precipitação e rendimento do milho no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v.2, p.39- 46.

Fontana, D.C.; Weber, E.; Ducati, J.R.; Berlato, M.A.; Guasselli, L.A.; GUSSO, A. 2002. Monitoramento da cultura da soja no centro-sul do Brasil durante a La Niña de 1998/2000. *Revista Brasileira Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 10, n.2, p. 343-351.

Grimm, A.M. 2004. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? *Climate Dynamics*, 22: 123.

Grimm, A.M.; Barros, V.R.; Doyle, M.E. 2000. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 13: 35-58.

Haykin, S. *Redes neuronais: princípios e prática*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.

Hickey, C.; Kelly, S.; Carroll, P.; O'connor, J. 2015. Prediction of forestry planned end products using dirichlet regression and neural networks. *Forest Science*, v.61, n.2, p.289-297.

Ibá. Performance indicators for the Brazilian planted tree sector, base year 2019. Brasília: Brazilian Tree Industry, 2020, p.66.

Landsberg, J. J.; Waring, R. H.; Coops, N. C. 2003. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. *Forest Ecology and Management.*, 172:199-214.

Landsberg, J.; Sands, P. *Physiological ecology of forest production: principles, processes and models*. Amsterdam: Elsevier, 2011. 331p.

Landsberg, J.J.; Waring, R.H. 1997. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95:209-228.

Leite, H. G.; DA Silva, M. L. M.; Binoti, D. H. B.; Fardin, L.; Takizawa, F. H. 2012. Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. Trees using artificial neural networks. *European Journal of Forest Research*, v.130, n.2, p.263-269, 2011.

Lemos, C.C.Z. *Aprimoramentos, teste e uso do modelo 3-PG em plantios clonais de Eucalyptus no nordeste do estado de São Paulo*. 2012. 175 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP.

Lopes, F.; Berlato, M. A. Impactos da La Niña nas Temperaturas Médias Mínimas no Estado do Rio Grande do Sul. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13.; 2001, Porto Alegre, Anais... Porto Alegre: UFRGS, 2001.

Liu, W.; Wu, J.; Fan, H.; Duan, H.; LI, Q.; Yuan, Y.; Zhang, H. 2017. Estimations of evapotranspiration in an age sequence of Eucalyptus plantations in subtropical China. *PLOS ONE*, v. 12, n. 4, p. e0174208. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174208>

Londero, E.K. *Calibração do modelo 3-PG para Eucalyptus saligna Smith na região de Guaíba*. 2011. 68 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

Marengo, J.A; Oliveira, G.S. Impactos do fenômeno La Niña no tempo e clima do Brasil: desenvolvimento e intensificação do La Niña 1998/1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10., 1998. Brasília, DF. Anais... Brasília: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998.CD-ROM.

Marengo, J.A. 2006. On the hydrological cycle of the Amazon basin: a historical review and current state-of-the-art. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21: 1-19.

- Martinkoski, L.; Vogel, G. F.; Jadoski, S. O. 2015. Influência do clima no crescimento diamétrico de *Araucária angustifolia*: revisão bibliográfica. Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias, v. 8, n. 2, p.104-111. <https://doi.org/10.5935/PAeT.V8.N2.12>
- Martins, E.R.; Binoti, M. L. M.S.; Leite, H. G.; Binoti, D. H. B.; Dutra, G. C. 2016. Configuração de redes neurais artificiais para estimação da altura total de árvores de eucalipto. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v.11, n.2, p.117-123.
- Meurer, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento de plantas. In: Novais, R. F.; Venegas, V. H. A.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. (Ed.). Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, 2007. p. 65–90.
- Minuzzi, R. B; Sediyaama, G. C.; Ribeiro, A.; Costa, J. M. N. 2005. El Niño: ocorrência e duração dos veranicos do Estado de Minas Gerais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande - PB, v. 9, n.3, p. 364-371. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000300011>
- Oliveira, G.S; Satyamurty, P. O El Nino de 1997/98: Evolução e impactos no Brasil. In: congresso brasileiro de meteorologia, 10., 1998, Brasília, DF. Anais... Brasília: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998. CD-ROM.
- Oliveira, B. R. U.; DE Figueiredo Latorraca, J. V.; Tomazello Filho, M.; Garcia, R. A.; DE Carvalho, A. M. 2011. Correlações dendroclimatológicas do *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na região de Rio Claro, RJ. Ciência Florestal, v.21, n.3, p.499-508, 2011.
- Otto, M.S.G.; Vergani, A.R.; Gonçalves, A.N.; Vrechi, A.; Silva, S.R.; Estape, J.L. 2013. Fotossíntese, condutância estomática e produtividade de clones de *Eucalyptus* sob diferentes condições edafoclimáticas. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.36, v.37, n.3, p. 431-439.
- Ozçelik, R.; Diamantopoulou, M. J.; Brooks, J. R.; Wiant, H. V. 2010. Estimating tree bole volume using artificial neural network models for four species in Turkey. Journal of environmental management, v.91, n.3, p.742-753.
- Paul, K.I.; Booth, T.H.; Jovanovic, T.; Sands, P.J.; Morris, J.D. 2007. Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia Forest Ecology and Management, Amsterdam, v.243, p.237-247.
- Peng, C.; Wen, X. Recent applications of artificial neural networks in forest resource management: an overview. 1999. Disponível em: <https://vww.aaai.org/Papers/Workshops/1999/WS-99-07/WS99-07-003.pdf>. Acesso em 15 de março de 2019.
- Pereira, A.R.; Angelocci, L.R.; Sentelhas, P.C. Agrometeorologia – Fundamentos e Aplicações. Guaíba: Editora Agropecuária, 478 p., 2002.
- Puchalski, L.A. Efeitos associados ao El Niño e La Niña na temperatura média, precipitação pluvial e no déficit hídrico no Estado do Rio Grande do Sul. 2000. 83p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Rascon, N. J. L. Modelagem ecofisiológica do desenvolvimento do Eucalipto na Amazônia. 2012. Tese (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Reffye, P.H. de; Houllier, F.; Auclair, D.; Barczi, J.; Dauzat, J. Tree architecture as a link between process and forest growth. In: empirical and process based models for forest tree and stand growth simulation, 1., 1997, Oeiras. Anais. Lisboa: Salamandra, 1999. p.53-60.

Rubilar, R. A.; Lee allen, H.; Fox, T. R.; Cook, R. L.; Albaugh, T. J.; Campoe, O. C. Advances in Silviculture of Intensively Managed Plantations. Current Forestry Reports, v., p., 2018.

Sands, P.; Landsberg, J.J. 2002. Parameterisation of 3-PG for plantation grown Eucalyptus globules. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v.163, p.273-292.

Sette Jr, C.R.; Tomazello Filho, M.; Dias, C.T.S.; Laclau, J.P. 2010. Crescimento em diâmetro do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill. ex. Maiden e relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. Revista Árvore, v.34, n.6, p.979-990.

Silva, G.G.C. Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em reposta à disponibilidade de água e nutrientes. 2006. 116p. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

Silva, W.C.M. Modelagem dos balanços de radiação e de água e simulação do crescimento do eucalipto na Bacia do Rio Doce. 2007. 104 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Silva, I. N.; Spatti, H. D.; Flauzino, R. A. Redes Neurais Artificiais: para engenharia e ciências aplicadas. São Paulo: Artliber, 399 p. 2010.

Silva, M.P.; Ribeiro, A. Redução de escala de simulações de mudanças climáticas para uso em agrometeorologia In: CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA, 6, 2010, Chillan. Anales... CIIACH, 2010.

Silva, R.M.L.; Hakamada, R.E.; Bazani, J.H.; Otto, M.S.G.; Stape, J.L. 2016. Fertilization response, light use, and growth efficiency in *Eucalyptus* plantations across soil and climate gradients in Brazil. Forests, v.7, n.117, p.1-12.

Stape, J.L. Production ecology of clonal eucalyptus plantations in northesastern Brazil. 2002. 225p. Tese (Doutorado) - Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2002.

Stape, J.L.; Ryan, M.G. & Binkley, D. 2004. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. Forest Ecology and Management, 193:219-234.

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. D. A.; Lima, A. M. N.; Gava, J. L.; LEITE, F. P.; Andrade, H. B.; Alves, J. M.; Silva, G. G. C.; Azevedo, M. R. 2010. 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.

Sukamoto Filho, A.A.; Couto, L.; Neves, J.C.L.; Passos, C.A.M.; Silva, M.L. 2004. Fixação de carbono em um sistema agrossilvipastoril com eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. *Agrossilvicultura, Viçosa*, v. 1, n. 1, p.29-41.

Wang, G.; Ynag, P.; Zhou, X. 2017. Identification of the driving forces of climate change using the longest instrumental temperature record. *Nature research journal*. 7, 46091; <https://doi.org/10.1038/srep46091>.

Wei, R.-P.; Xu, D. 2003. *Eucalyptus Plantations: Research, Management and Development: Proceedings of the International Symposium*. Guangzhou, China: World Scientific.

Xavier, A.C.; King, C.W.; Scanlon, B.R. 2015. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2015). *International Journal of Climatology*, v.36, n.6, p.2644–2659.

Vahedi, A. A. 2017. Monitoring soil carbon pool in the Hyrcanian coastal plain forest of Iran: Artificial neural network application in comparison with developing traditional models. *Catena*, v.152, p.182-189.

## **CAPÍTULO 1 - INFLUÊNCIA DO EL NIÑO E LA NIÑA NA PRODUTIVIDADE DE PLANTIOS DE EUCALIPTO EM DISTINTAS REGIÕES NO BRASIL**

### **1. Introdução**

O gênero *Eucalyptus* ocupa a maior superfície plantada no segmento florestal brasileiro com área de 6,97 milhões de hectares (IBA, 2019). Os Estados de Minas Gerais (MG), Bahia (BA) e Rio Grande do Sul (RS) se configuram atualmente como o primeiro (1.920.329 ha), o quarto (588.035 ha) e o quinto (456.001 ha), respectivamente (IBA, 2019). Estes locais possuem grande importância econômica devido à localização das principais unidades industriais dos segmentos de celulose, papel, painéis de madeira industrializada e siderurgia a carvão vegetal no país.

A alta produtividade alcançada nos plantios de eucalipto é resultado de pesquisas em diversas áreas de importância como solos e nutrição, melhoramento genético, climatologia, somada a alta tecnologia empregada nos tratamentos silviculturais e ao clima favorável (Freitas et al. 2020).

É importante conhecer os aspectos climáticos das regiões de plantios e, sobretudo, os eventos atípicos que ocorrem e suas influências no crescimento e produtividade das espécies. A transpiração das plantas é função, sobretudo, do estoque de água disponível no solo regulando a abertura estomática e o processo de difusão do vapor de água (Carneiro et al., 2008). A temperatura influencia vários processos fisiológicos, como a respiração, a transpiração, a divisão celular, a fotossíntese, podendo também afetar o enraizamento das árvores (Cunha et al., 2009). A radiação é a fonte energética responsável pela excitação da clorofila na faixa espectral do visível (0,40 a 0,70  $\mu\text{m}$ ) que desencadeia na produção de carboidratos por meio da fotossíntese.

Um fenômeno que interfere nas características climáticas da circulação de grande escala da atmosfera terrestre é o El Niño Oscilação Sul (ENOS). O ENOS ocorre entre o oceano e a atmosfera acoplados entre as áreas tropicais do oceano Pacífico, caracterizado por flutuações irregulares entre fases quentes (El Niño) e frias (La Niña) com periodicidade variando entre dois a sete anos (Lee et al, 2011). Este aquecimento-resfriamento provoca mudanças na circulação de grande escala da atmosfera, impondo um gradiente de pressão atmosférica que resulta em ventos de leste que arrastam as águas quentes superficiais em direção à Austrália, causando anomalias climáticas em várias regiões do globo.

O Brasil é um país de grande extensão territorial e por consequência, os eventos climáticos do ENOS atuam de forma diferenciada em seu território. A pouca consistência das anomalias no Sudeste é devida ao caráter de transição da região, pois as anomalias podem deslocar-se para norte ou para sul de um evento para outro podendo, assim, alterar o seu sinal em relação a eventos anteriores (Grimm & Ferraz, 1998). No Nordeste, o índice pluviométrico fica abaixo do normal, causando estiagem mais severa, no princípio do verão. Isso porque o aumento da temperatura das águas do oceano Pacífico afeta a instabilidade das massas de ar frio, que, no caso do Brasil, ficam estacionadas na região Sul (Alves et al., 1997). A climatologia da precipitação durante eventos ENOS mostra que para a região Sul do Brasil, na fase quente do fenômeno (El Niño) é observada ocorrência de precipitação superior à média climatológica em quase todos os meses do ano (Fontana & Berlato, 1997; Grimm et al., 1997).

Anomalias de chuvas e temperaturas provindas da ocorrência dos eventos de El Niño, têm sugerido impactos na produtividade primária na floresta Amazônia (Asner et al. 2000; Foley et al. 2002). Em estudos com espécies no deserto do Atacama, próximo a costa do Pacífico, Barichivich et al (2009) encontraram influência no crescimento das árvores com a presença interanual destes eventos climáticos. Poucos os estudos sobre os efeitos de fatores climáticos no incremento anual de volume de madeira e a relação com a produtividade do gênero *Eucalyptus* spp.

Os modelos baseados em processos (MBP) simulam os padrões de crescimento das árvores em termos de mecanismos biofísicos em resposta às condições climáticas e práticas de manejo. O modelo 3PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*) desenvolvido por Landsberg e Waring (1997) é um MBP que estima a produtividade florestal baseando-se essencialmente na quantidade de energia radiante que é absorvida pelo dossel, convertida e alocada nos diferentes componentes da árvore como folhas, lenho e raízes. É um modelo generalizado para povoamentos não específicos, aplicáveis para plantios de florestas homogêneas, dentre elas os plantios de eucalipto (Stape et al., 2004; Paul et al., 2007; Rodríguez et al., 2009).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña na produtividade de plantios de eucalipto, localizados nos Estados de MG, BA e RS, através do modelo 3PG.

## 2. Material e métodos

A área de estudo compreende plantios clonais de eucalipto nos estados da Bahia (BA), de Minas Gerais (MG) e do Rio Grande do Sul (RS) (Figura 1). Em cada um dos estados, trabalhou-se em três regiões, denominadas: BA1, BA2, BA3; RS1, RS2, RS3 e MG1, MG2, MG3.

No Estado da Bahia, o clima das regiões BA1, BA2 e BA3 é denominado ‘AS’ segundo a classificação de Köppen, sendo quente e úmido com estações bem definidas, seca no verão e chuvosa no inverno. A intensidade pluviométrica anual encontra-se entre 1100 e 1300 mm. As temperaturas mínimas do ar estão em torno de 23°C no inverno e as máximas em torno de 28°C no verão. As áreas se diferem quanto aos tipos de solo, estando presente o Latossolo Amarelo distrófico (LAd) na área 1 e 3 e Argissolo Amarelo distrófico (PAd) na área 2.

Em Minas Gerais, a região serrana MG1, o clima é do tipo Cwb, mesotérmico de inverno seco e verão ameno, com temperaturas abaixo de 22 °C. Possui relevo forte-ondulado a montanhoso, com solos pouco profundos, argilo-arenosos e pouco férteis. A precipitação média anual é de 1.258 mm, temperatura média anual de 21,2 °C. A região MG2 apresenta altitudes inferiores a 400 m, predomina o tipo Aw, tropical, com verão chuvoso e inverno seco de maio a setembro. O clima predominante na região MG3, pela classificação de Köppen, é do tipo Cwa, temperado chuvoso-mesotérmico, em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18 °C, e a do mês mais quente, superior a 22 °C, com as chuvas ocorrendo, predominantemente, no verão e no inverno, com baixas precipitações pluviais, possui relevo suave-ondulado a montanhoso, com solos rasos a profundos, argilo-arenosos e pouco férteis.

No Rio Grande do Sul, a região RS1 e a RS2 apresentam clima Cfa, subtropical, segundo a classificação de Köppen, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e a do mês mais frio inferior a 18°C, com temperatura média anual de 19,1°C e precipitação média anual de 1440 mm. As áreas estão inseridas na região fisiográfica conhecida como Depressão Central e relevo que varia de plano a montanhoso, com altitudes variando entre 85 a 185 m. Estas se diferem quanto ao tipo de solo, sendo que RS1 possui predominância dos solos Argissolos Vermelhos Alumínicos típicos (PVa) e RS2, a presença de solos Argissolo Vermelho distrófico típico. A RS3 se localiza na região fisiográfica conhecida como Campanha, com relevo suave, geralmente entre 60 a 120 metros de altitude. O clima da região é do tipo subtropical úmido com precipitações em torno de 1.400 mm.

Os dados climáticos (precipitação pluviométrica, temperatura, radiação solar e evapotranspiração potencial) foram obtidos para os talhões, considerando a localização

geográfica dos seus centroides, através de um banco de dados desenvolvido por Xavier et al. (2015). Esses autores utilizaram informações de 3625 postos pluviométricos da Agencia Nacional das Águas (ANA) e 735 estações meteorológicas (convencionais e automáticas) para estimar dados para todo o Brasil através de métodos de interpolação. Foi gerado um grid (resolução do pixel de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  (Lat x Long)) para todo o Brasil, com dados diários no período de 01/01/1980 a 31/12/2015. Com estes dados meteorológicos foi possível cobrir todas as regiões adequadamente (Figura 1).

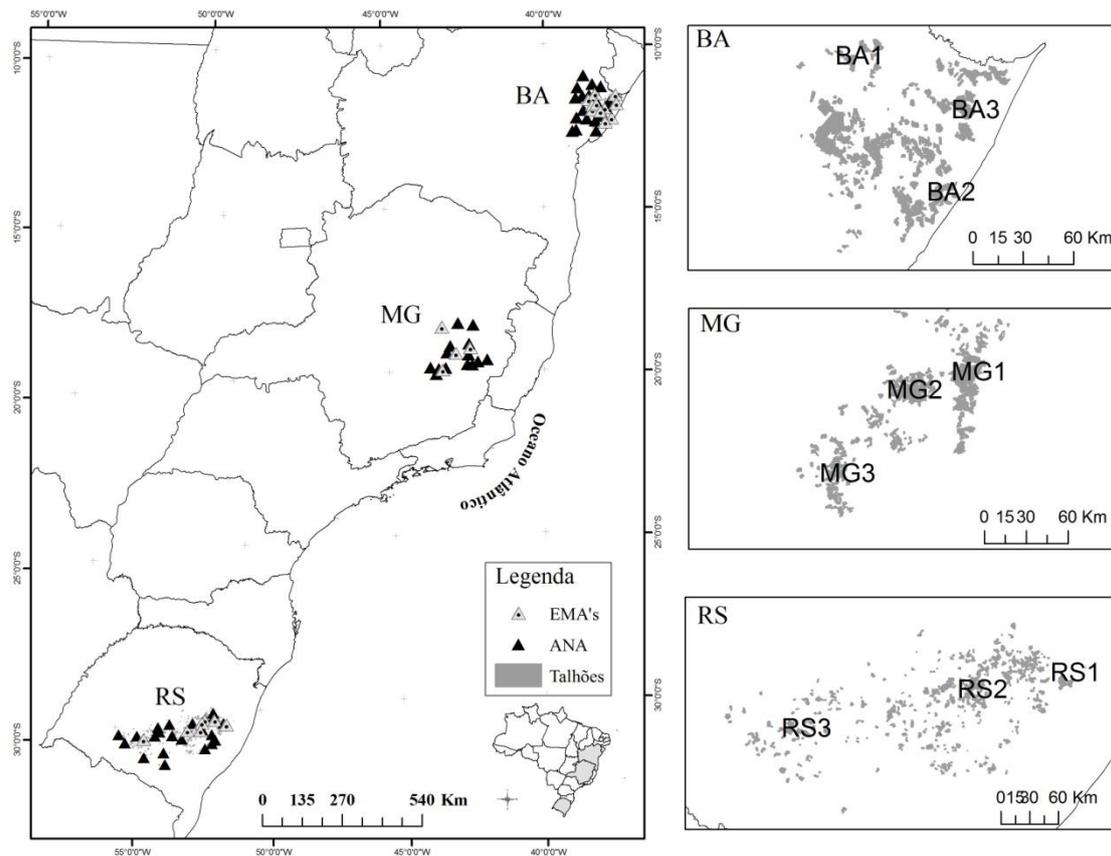


Figura 1. Estações meteorológicas (EMA's) e postos pluviométricos da ANA nas regiões de estudo. Em destaque as áreas de plantio de eucalipto em cada uma das regiões em que foram realizados os estudos.

Os anos de ocorrência das diferentes intensidades dos eventos El Niño e La Niña (Tabela 1) foram obtidos do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) que se baseou nos trabalhos de Ropelewski e Halpert (1989), Rasmusson e Carpenter (1983) e Ropelewski e Halpert (1987) em estudos de padrões de precipitação e temperatura nas regiões de influência destes eventos. Estes autores classificam cada um destes eventos em fraco, moderado e forte. Onde a intensidade do fenômeno é considerada forte quando a anomalia de temperatura da superfície do mar (TSM) foi superior a  $1,5^\circ\text{C}$  ou inferior a  $-1,5^\circ\text{C}$  em algum dos meses pertencentes à

série, enquanto os episódios de intensidade moderada tiveram valores inferiores à 1,5°C mas superiores à 1,0°C, ou valores superiores à -1,5°C mas inferiores à -1,0°C, e por fim, os episódios de intensidade fraca são aqueles com valores inferiores à 1,0°C mas superiores à 0,5°C ou com valores superiores à -1,0°C mas inferiores à -0,5°C.

Tabela 1. Datas de Ocorrência dos eventos de El Niño e La Niña em diferentes intensidades.

Fenômeno	Intensidade		
	Fraco	Moderado	Forte
El Niño	1992 - 1993	1986 - 1988	1982 - 1983
	2003 - 2004	1994 - 1995	1991 - 1992
	2004 - 2005	2002 - 2003	1997 - 1998
		2009 - 2010	1998 - 1999
La Niña	1983 - 1984	1964 - 1965	1988 - 1989
	1984 - 1985	1970 - 1971	1999 - 2000
	1995 - 1996	1998 - 2001	2007 - 2008
		2007 - 2008	2010 - 2011

Realizou-se a simulação dos parâmetros que expressam produtividade nos plantios de eucalipto utilizando o modelo 3PG. A descrição completa do modelo é fornecida por Landsberg e Waring (1997) e Sands e Landsberg (2002). Essencialmente, o 3PG estima a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (RFAA) por meio da lei de Beer.

O modelo tem como entradas os dados climáticos de médias mensais de temperatura máximas e mínimas do ar (°C); radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ); precipitação (mm); dias de geadas (dias  $\text{mês}^{-1}$ ); de pressão de vapor (mbar). O 3PG pode ser executado utilizando dados climáticos médios mensais de uma série histórica ou uma série definida em algum intervalo de tempo de interesse. Outros dados de entrada são relacionados aos solos como a taxa de fertilidade, textura e disponibilidade hídrica máxima no solo e à planta (biomassa inicial de folha, lenho e raízes, número de árvores).

Optou-se por uma parametrização única das características genéticas, uma vez que se trabalhou com híbridos de urograndis, semelhantes fenotipicamente. Os parâmetros foram utilizados do trabalho realizado por Silva *et al.* (2007) na região do vale do Rio Doce, em áreas de Minas Gerais, parte deste estudo.

A calibração do modelo foi feita a partir de dados de inventários das empresas nos talhões trabalhados. Foram obtidos a altura e o diâmetro à altura do peito (DAP). Calculou-se

o volume por meio do modelo biométrico (Shumacher e Hall, 1933) com coeficientes ajustados para as regionais das empresas (equação 1).

$$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln DAP + \beta_2 \ln H + \varepsilon \quad (1)$$

em que:  $V$  = volume de árvore ( $m^3$ );  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  = coeficientes para cada localidade estudada;  $DAP$  = diâmetro à altura do peito (cm);  $H$  = altura da árvore (m); e  $\varepsilon$  = erro aleatório.

Trabalhou-se com repetições de quatro talhões, em cada uma das três regiões nos Estados em estudo. As idades de três, cinco e sete anos foram avaliadas ao longo do ciclo.

As estimativas foram realizadas pelo 3PG, sendo empregadas como variáveis independentes e os dados do inventário como variáveis dependentes no modelo. Foi empregado análises de dispersão dos dados.

As simulações do 3PG foram feitas para os eventos El Niño e La Niña e suas intensidades durante os anos apresentado na Tabela 1. Calcularam-se os incrementos correntes anuais (ICA) para cada ano de evento simulado pelo modelo (equação 2). As médias dos estados, regiões e idades foram comparadas estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p \leq 5\%$ ).

$$ICA = V_m - V_{m-1} \quad (2)$$

onde:  $V_m$  = grandeza da variável no ano considerado;  $V_{m-1}$  = grandeza da variável no ano anterior;  $m$  = idade .

### 3. Resultados e discussão

A Figura 2 apresenta os distintos padrões de chuva e nos anexos encontram-se os padrões de temperatura máxima, mínima, amplitude térmica e radiação solar, obtidos a partir de eventos do El Niño e La Niña e as normais climatológicas nos três estados trabalhados.

Na região de estudo em MG os totais de precipitação apresentam uma distribuição irregular durante o ano, com um período de chuva que compreende os meses de outubro a março com 70% do total anual. Verifica-se menor dispersão dos dados nos meses de evento em relação às normais. A pouca consistência das anomalias no Sudeste é devida justamente ao caráter de transição da região, pois as anomalias podem deslocar-se para norte ou para sul de um evento para outro podendo, assim, alterar o seu sinal em relação a eventos anteriores (Grimm & Ferraz, 1998).

Já a região de estudo na BA apresenta uma distribuição regular da precipitação entre todos os meses do ano, com os maiores totais nos meses de abril a junho. Este padrão de chuvas está associado a proximidade do oceano e a circulação brisa terra-mar. As maiores médias de precipitação ocorrem nos anos onde a La Niña se apresenta forte e moderada e o contrário nos eventos do El Niño.

A região de estudo localizada no RS também apresenta uma distribuição de chuvas regular ao longo do ano devido sua latitude menor e a constante entrada de massa fria úmidas de ar oceânico. Dentre as três regiões, está apresenta um inverno mais rigoroso que contrasta com a coincidência do período menos chuvoso do ano com o período mais quente que vai de novembro a fevereiro. Os eventos de La Niña forte tendem a proporcionar menores totais anuais de chuvas. Chuvas mais intensas são vistas em El Niño forte e moderado.

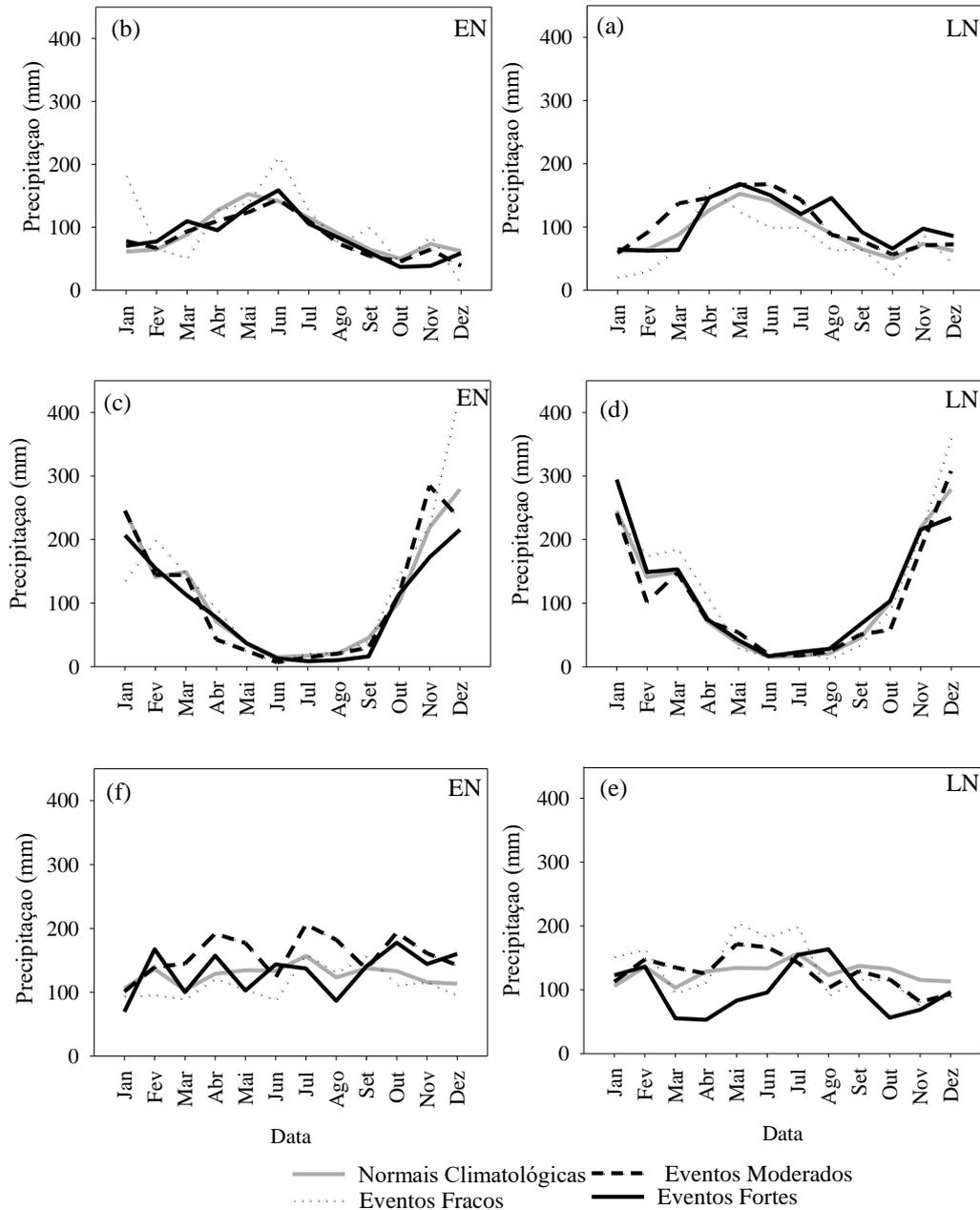


Figura 2. Caracterização dos totais mensais de chuva em eventos: fraco, moderado e forte do El Niño (EN) e da La Niña (LN) e as normais climatológicas nos estados da BA (a, b), MG (c, d) e RS (e, f).

A Figura 3 apresenta a dispersão dos dados de volume e DAP medidos e estimados pelo modelo 3PG. Verifica-se que de uma maneira geral, o modelo apresenta boas estimativas, sendo que os melhores resultados foram nos plantios de MG com inclinação da reta próxima ao valor unitário e coeficiente de determinação igual a 0,85 ( $n=71$ ).

O melhor ajuste para a região de Minas Gerais era esperado, uma vez que o modelo utilizou a parametrização para este local. Contudo, o ajuste para as outras regiões com

característica edafoclimáticas bastante distintas de MG, foi satisfatório com  $R^2$  entre 0,70 e 0,79 respectivamente para BA e RS. Isto indica que uma boa parametrização do solo e planta, somado aos dados climáticos com boa precisão torna a modelagem uma ferramenta útil para tomada de decisão silvicultural. Sands e Landsberg (2002) e Borges *et al.* (2012) obtiveram bons resultados na parametrização do modelo para plantios clonais de *E. urophylla* e *E. grandis*.

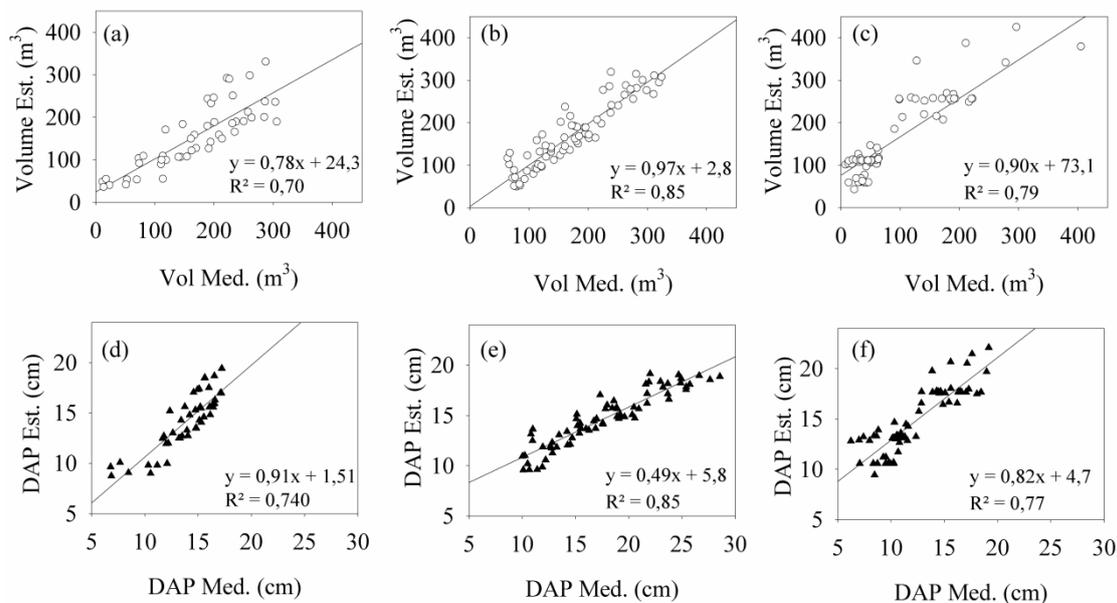


Figura 3. Dispersão dos dados mensurados de volume e DAP e estimados pelo modelo 3PG na BA (a,d), MG (b,e) e RS (c,f).

Os dados simulados de ICA possuem distintas respostas para cada região trabalhada com diferenças apresentadas nos padrões climatológicos dos eventos contrastantes de La Niña e El Niño detectadas pelo modelo (Tabela 2).

Observa-se que, de uma maneira geral, todas as regiões apresentaram maiores incrementos volumétricos nas menores idades. Cacau *et al.*, (2008) mostra que o incremento volumétrico em híbridos de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* aumentam de maneira exponencial, apresentando ponto de inflexão próximo aos 48 meses de idade, permanecendo constante após esta idade. A mesma tendência foi verificada por Dias *et al.*, (2005) em híbridos de *urograndis* na BA.

Na BA verifica-se que os incrementos volumétricos se diferem significativamente em resposta a parte dos eventos, sobretudo nas intensidades fortes e idades em pré-corte (sete anos). Verifica-se que em BA1 somente os eventos fortes se diferem estatisticamente entre si. Em geral, as menores taxas de incremento ocorrem nos eventos de El Niño forte e La Niña fraca, com médias gerais de ICA de 36,9, 34,5 e 22,5  $m^3 ha^{-1}$  para as idades de três, cinco e sete anos

respectivamente. Nestes eventos, a tendência é que haja menor volume de chuva e aumento de temperatura neste Estado. A La Niña forte determina em geral, as maiores médias de produtividades em BA1 e BA2. Em BA3 são observadas altas médias porém sem diferenças estatísticas deste evento em relação à La Niña moderada e o El Niño fraco. As maiores médias de ICA são de 60,4, 54,3 e 38,6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> aos três, cinco e sete anos, respectivamente. Soares et al., (2012) reportam que nos eventos da La Niña, a probabilidade de ocorrer prejuízos na agricultura é reduzida tampouco para a região semi-árida e oeste Nordeste.

Em MG, por ser uma região sem padrões definidos de chuva nestes eventos, conforme discutido anteriormente, foram observados maiores ICA's no El Niño forte e fraco em MG1, MG2 e El Niño fraco e La Niña moderada em MG3, com médias de 51,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (três anos), 48,2 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (cinco anos) e 39,3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (sete anos). Verifica-se que a La Niña, quando ocorre em intensidade moderada e fraca, confere as menores produtividades em MG1 e MG2 e La Niña fraca e El Niño moderado em MG3, com médias gerais de 33,6, 31,6 e 22,3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para as idades de três, cinco e sete anos respectivamente. Minuzzi et al., (2007) realizou um estudo para avaliar a influência da La Niña no Sudeste brasileiro, verificou que, na região deste estudo, ela exerce grande influência com cerca de 30 – 40% de possibilidade de afetar o início da estação chuvosa.

Embora os eventos de El Niño provoquem anomalias positivas de precipitação pluvial, no Rio Grande do Sul (Berlato e Fontana, 2003), verificou-se que este padrão seguiu tendências distintas em RS1 e RS2, localizadas na região fisiográfica da Depressão Central, de RS3, na Campanha. As menores produtividades são vistas nos eventos de La Niña forte e El Niño fraco, sendo que estas não apresentaram diferenças significativas em quase todas as idades e regiões. Os menores valores médios de ICA são de 44,0, 45,3 e 34,8 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> nas idades de três, cinco e sete anos, respectivamente. Os eventos do El Niño moderado contribuem com as maiores médias de produtividade no RS, sobretudo em RS3, localizada na região fisiográfica da Campanha. Porém, em alguns casos, ela não se difere estatisticamente de outros, sobretudo da La Niña moderada. Os maiores valores médios de ICA são 64,1, 58,8 e 39,4 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> seguindo a mesma ordem das idades anteriores.

Tabela 2. Valores do Incremento Médio Anual (ICA) de volume de madeira estimado pelo modelo 3PG nas distintas intensidades dos eventos do El Niño (EN) e La Niña (LN) ocorridas em três regiões nos estados da BA, MG e RS.

Locais	Evento	Região I						Região II						Região III					
		3 anos		5 anos		7 anos		3 anos		5 anos		7 anos		3 anos		5 anos		7 anos	
BA	LN-Fra.	23.1	ab	23.4	ab	17.8	ab	55.5	a	47.8	a	31.0	a	36.3	a	36.0	a	22.3	a
	LN-Mod.	30.6	bc	30.7	bc	20.5	abc	73.6	b	67.9	bc	38.9	b	56.8	b	48.8	b	31.9	b
	LN-For.	35.8	c	34.5	c	26.3	c	88.9	c	77.4	c	47.5	c	51.9	bcd	45.8	c	31.4	b
	EN-Fra.	30.4	bc	29.2	bc	21.4	bc	79.8	d	69.1	bc	44.5	d	55.8	cd	47.6	b	33.3	c
	EN-Mod.	26.2	ab	27.5	bc	21.9	bc	88.6	c	79.6	c	54.7	e	48.4	bcd	44.9	c	35.0	d
	EN-For.	18.9	a	19.7	a	14.4	a	62.1	e	60.7	ab	36.1	f	44.6	d	41.7	d	30.5	e
MG	LN-Fra.	33.8	a	31.8	a	22.2	a	26.5	a	27.6	a	19.4	a	40.7	a	35.6	a	25.3	a
	LN-Mod.	39.9	b	37.7	b	29.2	b	29.4	ab	28.9	a	22.6	b	58.0	cd	52.5	cd	40.0	bc
	LN-For.	53.4	c	48.8	c	38.6	d	32.4	b	29.1	a	23.2	bc	48.2	b	43.3	b	37.0	b
	EN-Fra.	56.4	d	52.9	d	44.3	e	38.0	c	36.2	b	30.7	e	54.3	c	49.5	c	42.9	c
	EN-Mod.	46.3	e	43.0	e	33.5	c	31.8	b	32.4	c	25.9	cd	37.6	a	37.9	a	32.0	b
	EN-For.	55.5	d	50.4	f	38.4	d	36.5	c	34.7	bc	27.4	d	60.3	d	55.5	d	42.6	c
RS	LN-Fra.	68.8	a	61.2	a	51.1	bc	44.5	a	40.3	bc	25.8	ab	47.7	a	43.9	a	36.8	ab
	LN-Mod.	74.4	b	69.3	b	51.2	c	48.4	a	42.9	c	27.7	b	60.3	b	54.8	c	38.6	bc
	LN-For.	65.4	c	58.4	c	50.9	bc	34.1	b	36.2	ab	23.7	c	37.9	c	43.3	a	34.8	a
	EN-Fra.	60.2	d	57.5	c	46.1	a	38.9	c	35.2	a	24.9	ac	41.1	c	46.5	ab	35.5	a
	EN-Mod.	74.7	b	67.3	b	49.7	bc	53.1	d	46.7	d	26.9	b	65.0	d	60.5	d	39.3	c
	EN-For.	70.7	a	64.4	d	49.0	b	41.0	c	38.0	ab	24.8	c	47.0	b	49.6	b	34.8	a

Para cada local, as colunas seguidas por uma mesma letra não diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Os incrementos de biomassa seguem a ordem de magnitude de ganho: lenho>raiz>folha nas três idades trabalhadas (Figura 4). Estes resultados condizem com os de Leles et al (2001) trabalhando com crescimento e produção de matéria seca em plantios de *E.camaudulensis* e *E. pellita*. Os valores negativos evidenciados no gráfico correspondem aos incrementos de biomassa de folhas na idade de sete anos. Couto et al., (2004) também verificaram redução da biomassa foliar nesta idade após a realização da análise destrutiva da parte aérea em clones híbridos de *Eucalyptus spp.*

As variações na biomassa impostas pelos eventos climáticos apresentam comportamentos distintos nas três regiões dos Estados de BA, MG e RS, conforme verificado na análise do ICA. De uma maneira geral, os eventos que limitaram a incorporação de biomassa apresentaram tendências mais nítidas quando comparado aos que influenciaram o maior ganho.

Em BA1 e BA2, os menores incrementos de biomassa são verificados nos eventos de El Niño forte e, sobretudo a La Niña fraca com diferenças significativas em relação aos demais eventos em todos os órgãos da planta avaliados. Em MG, a La Niña fraca contribui desfavoravelmente para o incremento. No RS, são observados menores valores da biomassa total nas três idades quando ocorre a La Niña forte e El Niño fraco.

Observa-se que para cada região houve uma variabilidade intra e inter regiões da biomassa estimada. Santana *et al.*, (2008) apresentou variações de biomassa entre distintas regiões do Brasil com diferenças de  $146 \text{ t ha}^{-1}$  aos sete anos de idade. Esses resultados reforçam a plasticidade de adaptação do eucalipto frente às condições climáticas presentes em distintas regiões do Brasil, mantendo elevada produtividade se não houver limitação por outros fatores de crescimento, reforçando a afirmativa que nas regiões tropicais, água e nutrientes seriam os dois principais fatores a limitar a produção florestal (Barros & Comerford, 2002).

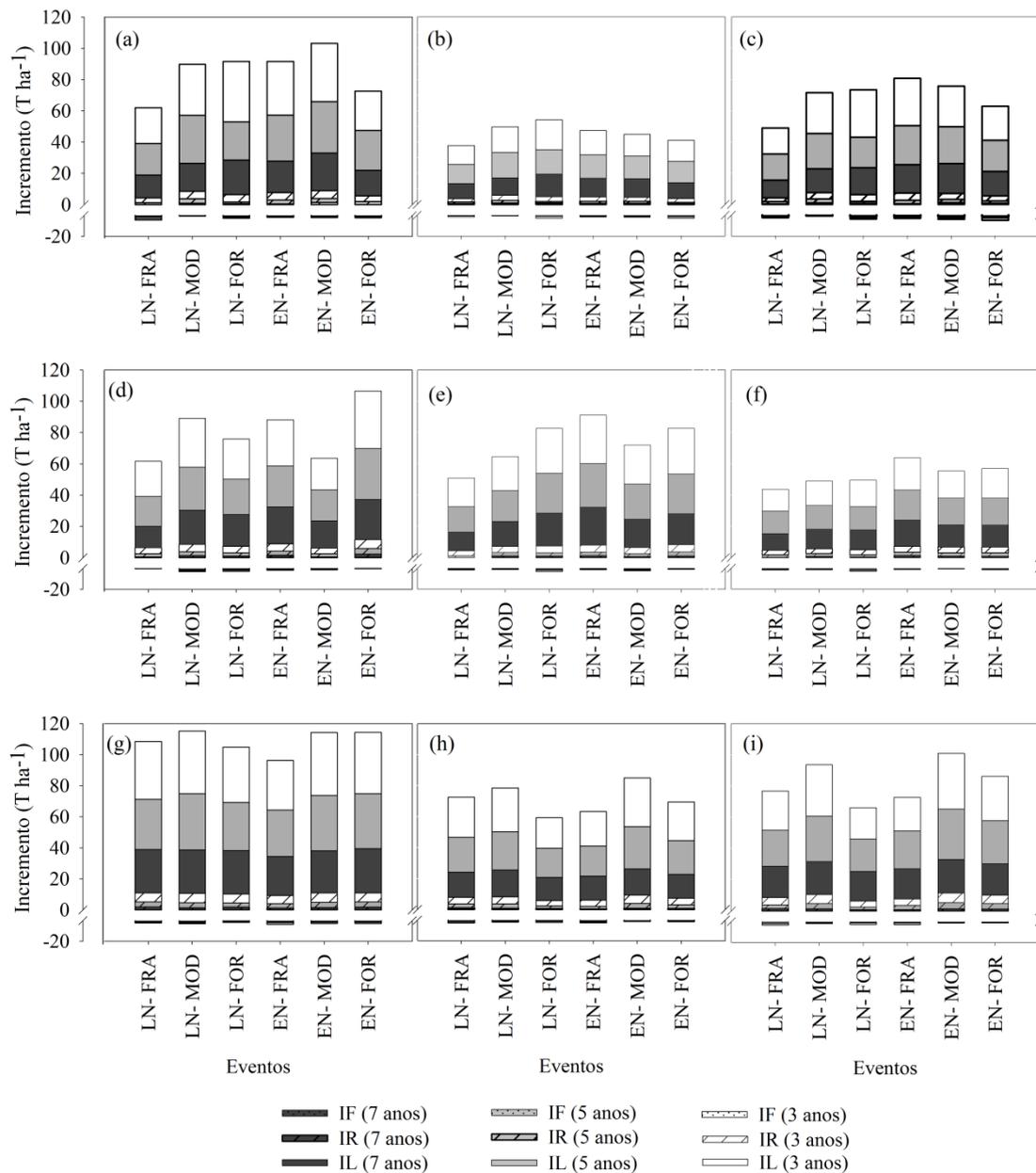


Figura 4. Particionamento dos incrementos de biomassa foliar (IF), de raiz (IR) e lenho (IL) estimada pelo modelo 3PG nos eventos da La Niña (LA) e El Niño (EN) ocorridas nos estados da BA, nas regiões BA1 (a), BA2 (b) e BA3 (c); MG nas regiões MG1(d), MG2 (e) e MG3 (f) e RS nas regiões RS1 (g), RS2 (h) e RS3 (i).

#### 4. Conclusões

Na região produtora do RS os anos de El Niño moderado e La Niña moderado favoreceram a produtividade do eucalipto nas três regiões e idades analisadas.

Na região da BA os anos de La Niña fraco e de El Niño forte prejudicaram a produtividade do eucalipto em todas as regiões e idades estudadas. Com uma produtividade média 37% menor.

## 5. Referências bibliográficas

Alves, J.M.B.; Souza, E.B. Repelli, C.A.; Ferreira, N.S. 1997. Um estudo da variabilidade pluviométrica no setor leste do nordeste brasileiro e a influência do fenômeno El Niño/Oscilação Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.12, n.2, p. 25-40.

Asner, G.P.; Townsend, A.R.; Braswell, B.H. Satellite observation of El Niño effects on Amazon forest phenology and productivity. *Geophys Res Lett*, v.27, p.981-84, 2000.

Barichivich, J.; Sauchyn, D.J.; Lara, A. 2009. Climate signals in high elevation tree-rings from the semiarid Andes of north-central Chile: Responses to regional and large-scale variability. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 281, p.320–333. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.033>

Barros, N.F. e Comerford, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: Alvarez V., V.H.; Schaefer, C.E.G.R.; Barros, N.F.; Mello, J.W.V. & Costa, L.M., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, Folha de Viçosa, v.2. p.487-592., 2002.

Carneiro, R.L.C., Ribeiro, A., Huaman, C.A.M., Leite, F.P., Sedyama, G.C., Barros NF. 2008. Water consumption in eucalypt plantation: part 1 determination of stomatal conductance in irrigated and non-irrigated treatments. *Revista Árvore* 32: 1-10. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000100001>

Couto, L.; Tsukamoto Filho, A.A.; Neves, J.C.L.; Passos, C.A.M.; Ribeiro, C.A.A.S.; Araujo, M.M.F.C. 2004. Produção e alocação de biomassa em um sistema agrissilvipastoril com eucalipto na região do Cerrado de Minas Gerais. *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 4, p. 321-334.

Cunha, A.C., Paiva, H.N., Leite, H.G., Barros, N.F., Leite, F.P. 2009. Relation of climate variables with eucalypt minicutting production and rooting. *Revista Árvore* 33:195-203. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000200001>

Foley J. A., Botta A, Coe M.T. 2002. El Niño–Southern oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia. *Global Biogeochem Cycles*, v. 16 p.1132. <https://doi.org/10.1029/2002GB001872>

Freitas, E. C. S.; Paiva, H. N.; Neves, J. C. L.; Marcatti, G. E.; Leire, H. G. 2020. Modeling of eucalyptus productivity with artificial neural networks. *Industrial Crops and Products* v.146, April 2020, 112149. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112149>

Fontana, D. C.; Berlato, M. A. 1997. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.5, n.1, p.127-132.

Grimm, A. M.; Ferraz, S. E. T.; Gomes, J. 1998. Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of climate*, v.11, p.2863-2880.

Grimm, A.M.; Guetter, A.K.; Caramori, P.H. El Niño no Paraná: o que se pode esperar em cada região. Uma análise científica. SIMEPAR – Curitiba, 1997, 9 p. (*Informativo*, 1).

Hoskins, B.J. & Karoly, D.J. 1981. The steady linear response of a sphetical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J. Atmos. Sci.*, v.38, p.1179-1196.

Landsberg, J.J., Waring, R.H. 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology Management*, v.95, p.209–228, 1997.

Ibá. Performance indicators for the Brazilian planted tree sector, base year 2019. Brasília: Brazilian Tree Industry, 2020, p.66.

Leles, P.S.S.; Reis, G. G.; Reis, M. G.F.; Morais, E. J. Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. *Scientia forestalis*, n. 59, p. 77-87, 2001.

LI, W.; Zhang, P.; YE, J.; LI, L.; Baker, P.A. 2011. Impact of two different types of El Niño events on the Amazon climate and ecosystem productivity. *Journal of Plant Ecology*, v.4 (2), p. 91-99. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtq039>

Opsteegh, J.D. & van Dool, H .Me, Seasonal differences In the statlonary response of a linearized primitive equation model: prospects for. long-range forecasting? *J. Atrhos. Sci.*, 37: 2169-2185; 1980.

Paul, K.I., Booth, T. H. Jovanovic, T., Sands, P. j. Morris, J. D. Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia. *Forest Ecology and Management*, v. 243, p. 237–247, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.029>

Rasmusson, E.M.; Carpenter, T.H. The relationship between eastern equatorial Pacific sea surface temperature and rainfall over India and Sri Lanka. *Monthly. Weather Review*, v. 111, p.517–528, 1983.

Rodríguez, R. Real, P., Espinosa, M., Perry, D.A. A process-based model to evaluate site quality for *Eucalyptus nitens* in the Bio-Bio Region of Chile. *Forestry*, v. 82, n.2, p.149-162, 2009. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpn045>

Ropelewski, C. F. and Halpert, M. S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the el Niño/southern oscillation. *Monthly Weather Review*, v.115 p.1606–1626, 1987.

Ropelewski, C. F. and Halpert, M. S. Precipitation patterns associated with high index phase of the southern oscillation. *Journal of Climate*, 2:260–284, 1989.

Santana, R.C.; Barros, N.F.; Leite, H.G.; Comerford, N.B.; Novais, R.N. 2008. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. *Revista Árvore*, v.32, n.4, p.697-706. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000400011>

Schumacher, F. X.; Hall, F. S. 1993. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, v. 47, n. 9, p. 719-734.

Guimaraes, D. P.; Silva, G. G. C. da; Sans, L. M. A.; Leite, F. P. 2007. Uso do modelo de crescimento 3-PG para o zoneamento do potencial produtivo do eucalipto no estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 15, p. 189-195.

Stape, J. L.; Ryan, M. G.; Binkley, D. 2004. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis-urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. *Forest Ecology and Management*, v. 193, p. 219–234. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.031>

## **CAPÍTULO 2 - MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE EUCALIPTO USANDO REDES NEURONAIIS ARTIFICIAIS E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE ADVERSIDADE CLIMÁTICAS**

### **1. Introdução**

No Brasil, as florestas plantadas são responsáveis por 100% do suprimento nacional de madeira para a indústria da celulose, além de fornecerem matéria prima para as indústrias moveleira e siderúrgica e contribuírem para a conservação e preservação das florestas nativas. O gênero *Eucalyptus* é um dos mais adotados nos programas de reflorestamento, por apresentar características como rápido crescimento, alta produtividade e boa adaptação às diferentes condições edafoclimáticas (Stape *et al.*, 2010; Booth, 2013).

A silvicultura brasileira é uma das mais avançadas do mundo, com uma produtividade média de 35,7 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup> e ciclos mais curtos de 5 a 9 anos (Iba, 20120). O clima favorável, as condições do solo, além de investimentos contínuos das empresas contribuem para o bom desenvolvimento das florestas (Booth, 2013; Christina *et al.*, 2015; Campoe *et al.*, 2016).

As incertezas dos impactos das mudanças climáticas na produtividade dos cultivos de eucalipto impõem a busca de ferramentas de simulação eficientes capazes de prever possíveis quebra de produção. A duração do ciclo da cultura (5 a 9 anos) associado as bases de planejamento projetar três ciclos, ou até 27 anos, torna o conhecimento dos possíveis impactos das mudanças ambientais ainda mais importante para a sustentabilidade da atividade. Dentre as etapas dependentes desta previsão está o abastecimento das fábricas e necessidade de expansão de área plantada e melhorias no manejo silvicultural.

Os ciclos de aquecimento e resfriamento das águas superficiais do atlântico, *El niño* e *La niña*, vêm sendo apontado como o principal driving force das mudanças climáticas tendo ciclos de 3,36 e 22,6 anos (Wang *et al.*, 2017). No Brasil, o sinal do ENOS se dá, principalmente, por anomalias climáticas de precipitação pluviométrica e a temperatura do ar das regiões Sul e Nordeste (Grimm *et al.*, 2000; Fontana e Berlato, 1997; Oliveira e Satyamurty, 1998; Marengo e Oliveira, 1998; DIAZ *et al.*, 1998; Puchalski, 200; Berlato & Fontana, 2003).

Anomalias de chuvas e temperaturas provindas da ocorrência dos eventos de *El Niño*, têm sugerido impactos na produtividade primária na floresta Amazônia (Asner *et al.* 2000; Foley *et al.* 2002). Em estudos com espécies no deserto do Atacama, próximo a costa

do Pacífico, Barichivich *et al* (2009) encontraram influência no crescimento das árvores com a presença interanual destes eventos climáticos.

Tendências sobre os padrões atuais relacionadas às principais espécies florestais poderão ser indicadores de futuras expansões de base florestais, assim como prever áreas estratégicas para conservação. Um meio para quantificar o potencial produtivo de uma floresta tem sido a utilização de modelos de crescimento baseados em processos ecofisiológicos (Barros e Comerford, 2002).

Os modelos de crescimento e produção são definidos como um conjunto de relações matemáticas que descrevem quantitativamente um determinado sistema, por exemplo, o povoamento florestal (Berger *et al.*, 2002). A simulação de crescimento de uma árvore ou povoamento permite analisar seu comportamento em determinadas condições, fornecendo informações importantes para o gestor florestal tomar decisões (Maestri *et al.*, 2013).

Em relação aos modelos descritivos, a inclusão de variáveis climáticas permite maior explicação da variabilidade encontrada, e a melhoria na capacidade de generalização desses modelos (Maestri *et al.*, 2013). Entretanto, a modelagem habitual tem dificultada de incluir variáveis climáticas de uma forma que represente a realidade, por causa do grande número de variáveis independentes e as relações complexas geralmente não lineares com a variável dependente. Nesse sentido, as Redes Neurais Artificiais (RNA) têm se mostrado uma boa ferramenta para modelar a relação entre a produtividade florestal e os diversos fatores, bióticos e abióticos, que a influenciam ( Ozçelik *et al.*, 2013; Binoti *et al.*, 2015.; Campos *et al.*; 2016; Silva Ribeiro *et al.*, 2016; Martins *et al.*, 2016; Vahedi, 2017, Alcântara, 2018, Freitas *et el.*, 2020).

Nesse sentido, o objetivo desse estudo foi configurar, treinar e validar redes neurais artificiais para estimar a produtividade de povoamentos de eucalipto no Brasil, utilizando como variáveis de entrada os padrões climáticos atuais.

## **2. Material e métodos**

Os dados desse estudo foram obtidos em povoamentos de eucalipto, pertencentes à Empresas florestais, localizados em diferentes regiões do Brasil. Foram utilizados dados de 580 talhões, com tamanho entre 26 e 79 ha.

Os dados utilizados são referentes ao incremento médio anual em volume de madeira estimado por meio de inventário florestal contínuo (IFC).

Os dados meteorológicos (precipitação pluviométrica, temperatura, amplitude térmica, umidade relativa, radiação solar e evapotranspiração potencial) foram obtidos para os talhões, considerando a localização geográfica dos seus centros, através de um banco de dados desenvolvido por Xavier et al. (2015). Esses autores utilizaram informações de 3625 pluviômetros e 735 estações (convencionais e automáticas) para estimar dados para todo o Brasil através de métodos de interpolação. Foi gerado um *grid* (resolução do pixel de 0,25° x 0,25° (Lat x Long)) para todo o Brasil, com dados diários no período de 01/01/1980 a 31/12/2015. Assim, talhões próximos, que estão no mesmo pixel, possuem os mesmos valores para as variáveis climáticas.

Foram incluídas ao banco de dados meteorológico o cálculo da soma mensal do número de dias com precipitação, temperaturas máximas, mínimas, amplitude térmica, radiação solar, os períodos de veranicos, *El niño* e *La niña*.

Com os dados de precipitação pluviométrica e evapotranspiração potencial foi calculado o balanço hídrico climatológico normal (1980-2015) e sequencial (10 anos anteriores ao sexto ano do plantio) pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), exemplificado por Pereira et al. (2002), utilizando uma CAD (capacidade máxima de armazenamento) de 300 mm, como sugerido pelos mesmos autores.

Foram considerados os dados dos oito anos anteriores ao sexto ano do plantio para a precipitação pluviométrica e déficit hídrico, ou seja, quatro anos anteriores ao plantio, uma vez que o ritmo de crescimento não depende exclusivamente das condições climáticas do ano de avaliação, mas também das condições anteriores. E para as outras variáveis foram consideradas as médias dos seis anos da rotação, pois a variação ao longo desses anos é pequena. Também foram obtidas as médias do período 1980-2015 para as variáveis climáticas.

Um resumo dos dados utilizados para treinar as redes pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis utilizadas para treinar as redes neuronais artificiais

<b>Variável de Saída</b>	<b>unidade</b>
IMA - Incremento médio anual	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>
<b>Variáveis Contínuas</b>	<b>unidade</b>

---

Pre1 - Precipitação pluviométrica de quatro anos antes do plantio	mm ano <sup>-1</sup>
Pre2 - Precipitação pluviométrica de três anos antes do plantio	mm ano <sup>-1</sup>
Pre3 - Precipitação pluviométrica de dois anos antes do plantio	mm ano <sup>-1</sup>
Pre4 - Precipitação pluviométrica do ano anterior ao plantio	mm ano <sup>-1</sup>
Pre5 - Precipitação pluviométrica do ano de plantio	mm ano <sup>-1</sup>
Pre6 - Precipitação pluviométrica do primeiro ano após o plantio	mm ano <sup>-1</sup>
Pre7 - Precipitação pluviométrica do segundo ano após o plantio	mm ano <sup>-1</sup>
Pre8 - Precipitação pluviométrica do terceiro ano após o plantio	mm ano <sup>-1</sup>
Pre9 - Precipitação pluviométrica do quarto ano após o plantio	mm ano <sup>-1</sup>
Pre10 - Precipitação pluviométrica do quinto ano após o plantio	mm ano <sup>-1</sup>
Pre_soma (8 anos) – Precipitação pluviométrica total dos seis anos da rotação mais dois anos anteriores ao plantio	mm ano <sup>-1</sup>
Tmax - Temperatura máxima (média dos 6 anos do plantio)	°C
Tmin - Temperatura mínima (média dos 6 anos do plantio)	°C
Tmed - Temperatura média (média dos 6 anos do plantio)	°C
Apterm- Amplitude térmica (média dos 6 anos do plantio)	°C
Etp - Evapotranspiração potencial (média dos 6 anos do plantio)	mm ano <sup>-1</sup>
UR - Umidade Relativa (média dos 6 anos do plantio)	%
Rad – Radiação solar (média dos 6 anos do plantio)	MJ m <sup>-2</sup>
DH1 - Déficit hídrico do quinto ano após o plantio	mm ano <sup>-1</sup>
DH2 - Déficit hídrico do quarto ano após o plantio	mm ano <sup>-1</sup>
DH3 - Déficit hídrico do terceiro ano após o plantio	mm ano <sup>-1</sup>
DH4 - Déficit hídrico do segundo ano após o plantio	mm ano <sup>-1</sup>
DH5 - Déficit hídrico do primeiro ano após o plantio	mm ano <sup>-1</sup>
DH6 - Déficit hídrico do ano de plantio	mm ano <sup>-1</sup>
DH7 - Déficit hídrico ano anterior ao plantio	mm ano <sup>-1</sup>
DH8 - Déficit hídrico de dois anos antes do plantio	mm ano <sup>-1</sup>
DH9 - Déficit hídrico de três anos antes do plantio	mm ano <sup>-1</sup>
DH10 - Déficit hídrico de quatro anos antes do plantio	mm ano <sup>-1</sup>
Pre_nor – Precipitação pluviométrica (média de 1980 a 2015)	mm ano <sup>-1</sup>
Tmax_nor - Temperatura máxima (média de 1980 a 2015)	°C
Tmin_nor - Temperatura mínima (média de 1980 a 2015)	°C

Tmed_nor - Temperatura média (média de 1980 a 2015)	°C
Apterm_nor - Amplitude térmica (média de 1980 a 2015)	°C
Etp_nor - Evapotranspiração potencial (média de 1980 a 2015)	mm ano <sup>-1</sup>
UR_nor - Umidade Relativa (média de 1980 a 2015)	%
DH_nor - Déficit hídrico (média de 1980 a 2015)	MJ m <sup>-2</sup>
Rad_nor – Radiação solar (média de 1980 a 2015)	-
Nº dias Tmin Inf a 10° C – Número de dias com temperaturas mínimas inferiores a 10° C (Nos 6 anos do plantio)	
Nº dias Tmin entre 10° C e 15° C – Número de dias com temperaturas mínimas entre 10° C e 15° C (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº dias Tmax entre 10° C e 20° C – Número de dias com temperaturas máximas entre 10° C e 20° C (Nos 6 anos do plantio)	
Nº dias Tmax entre 20° C e 30° C – Número de dias com temperaturas máximas entre 20° C e 30° C (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº dias Tmax entre 30° C e 35° C – Número de dias com temperaturas máximas entre 30° C e 35° C (Nos 6 anos do plantio)	
Nº dias Tmax sup 35° C – Número de dias com temperaturas máximas superior a 35° C (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº dias Apterm entre 0° C e 5° C – Número de dias com amplitude térmica entre 0° C e 5° C (Nos 6 anos do plantio)	
Nº dias Apterm entre 5° C e 10° C – Número de dias com amplitude térmica entre 0° C e 5° C (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº dias Apterm entre 10° C e 20° C – Número de dias com amplitude térmica entre 10° C e 20° C (Nos 6 anos do plantio)	
Nº dias Apterm sup 20° C – Número de dias com amplitude térmica superior a 20° C (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº dias Pre. Inf 1 mm – Número de dias com precipitação inferior a 1mm (Nos 6 anos do plantio)	
Nº dias Pre. entre 1 mm e 5 mm – Número de dias com precipitação entre 1mm e 5 mm (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº dias Pre. entre 5 mm e 10 mm – Número de dias com precipitação entre 5 mm e 10 mm (Nos 6 anos do plantio)	

Nº dias Pre. entre 10 mm e 20 mm – Número de dias com precipitação entre 10 mm e 20 mm (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº dias Pre. entre 20 mm e 40 mm – Número de dias com precipitação entre 20 mm e 40 mm (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº dias Pre. Sup. a 40 mm – Número de dias com precipitação superior a (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº dias Rad. entre 0 MJ m <sup>-2</sup> e 10 MJ m <sup>-2</sup> – Número de dias com radiação solar entre 0 MJ m <sup>-2</sup> e 10 MJ m <sup>-2</sup> (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº dias Rad. entre 10 MJ m <sup>-2</sup> e 15 MJ m <sup>-2</sup> – Número de dias com radiação solar entre 10 MJ m <sup>-2</sup> e 15 MJ m <sup>-2</sup> (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº dias Rad. entre 15 MJ m <sup>-2</sup> e 20 MJ m <sup>-2</sup> – Número de dias com radiação solar entre 15 MJ m <sup>-2</sup> e 20 MJ m <sup>-2</sup> (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº dias Rad. sup. 20 MJ m <sup>-2</sup> – Número de dias com radiação solar superior a 20 MJ m <sup>-2</sup> (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº Ver3. – Número de veranicos de 3 dias (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº Ver4. – Número de veranicos de 4 dias (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº Ver5. – Número de veranicos de 5 dias (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº Ver6. – Número de veranicos de 6 dias (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº Ver7. – Número de veranicos de 7 dias (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº Ver8. – Número de veranicos de 8 dias (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº Ver9. – Número de veranicos de 9 dias (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº Ver10. – Número de veranicos de 10 dias (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº Ver11. – Número de veranicos de 11 dias (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº Ver12. – Número de veranicos de 12 dias (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº Ver13. – Número de veranicos de 13 dias (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº Ver14. – Número de veranicos de 14 dias (Nos 6 anos do plantio)	-
Nº Ver15. – Número de veranicos de 15 dias (Nos 6 anos do plantio)	-
El nino forte – Presença de El nino forte (Nos 6 anos do plantio)	-
El nino moderado – Presença de El nino moderado (Nos 6 anos do plantio)	-
El nino fraco - Presença de El nino fraco (Nos 6 anos do plantio)	-
La nina forte - Presença de La nina forte (Nos 6 anos do plantio)	-
La nina moderada - Presença de La nina moderada (Nos 6 anos do plantio)	-

As redes treinadas foram do tipo Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP), que consistem de duas camadas de neurônios artificiais que processam os dados (camada intermediária e camada de saída) e uma camada de neurônios artificiais que recebe os dados (camada de entrada) e direciona-os à camada intermediária. Para obtenção das redes neuronais artificiais, utilizou-se o software Neuroforest, versão 4.0.6 (<http://neuroforest.ucoz.com/>).

As redes foram treinadas alterando as variáveis de entrada (redes com todas as variáveis; utilizando os valores anuais, a somatória ou a média dos oito anos anteriores ao sexto ano do plantio para as variáveis precipitação pluviométrica, déficit hídrico, veranicos, número de dias de precipitação, temperatura, amplitude térmica, radiação solar, *El niño* e *La niña*); número de neurônios na camada oculta, sendo que o número de neurônios na camada de entrada variou em função do número de variáveis independentes consideradas em cada configuração; algoritmos de treinamento (Backpropagation, Resilient Propagation (Rprop+), e Quick Propagation); porcentagem de dados no subconjunto de treino (90 a 70 %) e validação, nos quais a seleção foi feita aleatoriamente; e as funções de ativação (logística, tangente hiperbólica, linear) nas camadas intermediárias (exceto função linear) e de saída. Foram treinadas 100 redes para cada configuração.

O critério de parada utilizado foi o número de ciclos (3000) e o erro médio (0,0001), ou seja, o treinamento da rede foi interrompido ao atingir algum desses critérios.

As redes foram selecionadas com base na correlação entre o IMA6 observado e o estimado ( $r_{\hat{y}y}$ ), raiz quadrada do erro quadrático médio em porcentagem (REQM (%)) (equação 1).

$$REQM(\%) = \frac{100}{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

em que  $\bar{y}$  é a média dos valores totais observados;  $n$  o número total de observações;  $y_i$  o valor observado e  $\hat{y}$  o valor estimado.

A REQM avalia a precisão da estimativa, e quanto menor, mais preciso, e a correlação indica o grau e a direção da associação entre o IMA estimado e o observado.

### 3. Resultados e discussão

De todas as configurações executadas, foram selecionadas as 12 melhores redes (Tabela 2), as quais apresentaram maior  $r_{yy}$  na validação. Todas as redes foram obtidas com o algoritmo de treinamento Resilient Propagation (Rprop+), utilizando a função logística, tanto na camada oculta (8 neurônios) como na de entrada. Os melhores resultados da  $r_{yy}$  e REQM (%) foram obtidos utilizando 90% dos dados para o treinamento nas redes RNA 60, RNA 68, RNA 24, RNA 19; 85% para as redes RNA 29, RNA 83, RNA 89; 80% para a rede RNA 69 e 70% para RNA 70 e 54 (Tabela 2).

A RNA 68 foi a rede que obteve os melhores desempenhos entre todas as redes testadas. Ela leva em consideração além das variáveis climáticas anuais o somatório do número de veranicos e os fenômenos *El nino* e *La nina*. A adição dessas variáveis melhorou a precisão da estimativa e associação entre os valores estimados e observados.

Essa melhora na resposta da rede pode ser explicada pelas anomalias positivas e negativas da temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico associadas aos episódios *El Niño* e *La Niña* que produzem circulações anômalas de grande escala na atmosfera, gerando impactos significativos no clima da região do Atlântico e da América do Sul (Aceituno 1988; Fontana e Berlato, 1996; Coelho e Ambrizzi, 2000; Grimm *et al.* 2000; Puchalski, 2000; Grimm, 2004, Grimm e Tedeschi, 2004; Cera e Ferraz, 2015). Marengo (2006) observou, para o período de 1979-2000, reduções na precipitação, no escoamento e na convergência de umidade em anos de *El Niño*, e aumentos destas variáveis em anos de *La Niña*.

Rede	Variáveis	% Treino	% Validação	MLP	Numero de ciclos	Função de ativação		Treino		Validação	
						Camada oculta	Camada de saída	$r_{yf}$	REQM (%)	$r_{yf}$	REQM (%)
RNA 70	Todas as Variáveis	70	30	316-8-1	3000	Logistica	Logistica	0,72	4,85	0,66	5,38
RNA 69	Todas as variáveis menos as normais climatológicas	80	20	307-8-1	3000	Logistica	Logistica	0,72	4,98	0,68	4,64
RNA 29	Todas as variáveis menos as normais e o N° de dias de radiação	85	15	292-8-1	3000	Logistica	Logistica	0,71	5,01	0,69	4,36
RNA 83	todas as variáveis menos normais e radiação	85	15	277-8-1	3000	Logistica	Logistica	0,72	4,96	0,69	4,84
RNA 60	Todas as variáveis menos as normais e o N° de dias de radiação, N° de dias de temperaturas máximas e mínimas	90	10	235-8-1	3000	Logistica	Logistica	0,72	4,97	0,69	4,55
RNA 54	Todas as variáveis menos as normais e o N° de dias de radiação, N° de dias de temperaturas máximas e	70	30	211-8-1	3000	Logistica	Logistica	0,73	4,95	0,69	5,01

	mínimas e amplitude térmica										
RNA 76	Médias anuais + N° de dias com precipitação 1mm + N de dias com precipitação entre 1 e 5 mm Veranicos + El nino + La nina	80	20	187-8-1	3000	Logistica	Logistica	0,72	4,76	0,68	5,68
RNA 68	Médias anuais + Veranicos + El nino + La nina	90	10	175-8-1	3000	Logistica	Logistica	0,71	4,87	0,73	5,41
RNA 24	medias anuais + veranicos 10, 11,12,13,14,15 dias + El nino + La nina	90	10	133-8-1	3000	Logistica	Logistica	0,72	4,86	0,66	5,39
RNA 11	medias anuais + El nino + La nina	80	20	97-8-1	3000	Logistica	Logistica	0,70	4,92	0,69	5,43
RNA 19	Normais climatológicas + El nino + La nina	90	10	55-8-1	3000	Logistica	Logistica	0,71	5,00	0,63	5,19
RNA 89	Médias anuais	85	15	55-8-1	3000	Logistica	Logistica	0,70	5,05	0,67	4,84

Os Veranicos melhoram a distribuição da precipitação ao longo do ano dentro do modelo. Sendo que a precipitação tem grande influência no aproveitamento dos recursos ambientais pelas espécies arbóreas e, conseqüentemente, na produtividade florestal. Stape *et al.* (2004a) avaliaram a produção de madeira em povoamentos de eucalipto em função da disponibilidade de água durante dois anos e observaram a sua influência no crescimento das árvores. O crescimento no tratamento controle (sem irrigação) correspondeu a 86 % e 42 % do crescimento nas parcelas irrigadas no ano de pluviosidade superior (1770 mm ano<sup>-1</sup>) e inferior (1210 mm ano<sup>-1</sup>), respectivamente. O mesmo foi observado por Otto *et al.* (2014) em plantios clonais de eucalipto, localizados em regiões com temperatura média anual de 23,6 °C e precipitação média anual de 1390 mm, em que a produção primária líquida em parcelas sem irrigação foi 17 a 36 % menor que nas parcelas com irrigação.

Sette Jr *et al.* (2010) estudaram o incremento em diâmetro de árvores de *Eucalyptus grandis* durante dois anos em resposta as variáveis climáticas. Os autores observaram que o período de crescimento máximo do tronco das árvores está relacionado com os altos níveis de precipitação, temperatura, disponibilidade de água no solo e de horas de luz/dia. Durante o período de avaliação, a taxa de incremento em diâmetro foi alta em um mês com veranico, ou seja, baixas pluviosidades, sendo resultante da absorção de água armazenada nas camadas mais profundas do solo. Assim, segundo os autores, as árvores expressam o crescimento do tronco em resposta às variáveis climáticas após um intervalo de tempo, considerado como período de defasagem.

Nesse sentido é interessante considerar o número de dias de veranicos, uma vez que ao considerar somente a soma anual de precipitação, uma alteração da produtividade florestal causada por algum extremo climático ao longo do ano poderá ser atribuída erroneamente a outros fatores.

As redes ajustadas nesse trabalho foram consideradas satisfatórias, obtendo, na validação um REQM abaixo de 6% e correlações acima de 60%. Estes resultados são inferiores aos encontrados por Binoti *et al.* (2015) em seus estudos com prognose da produção de povoamentos de eucalipto, que obtiveram, na validação, REQM menor que 5 % e correlação maior que 95 %. Porém estes autores utilizaram variáveis quantitativas (idade, área basal, volume) e categóricas (classe de solo, textura, espaçamento, relevo, projeto, clone).

Embora apresentem precisão inferior às redes que incluem dados do IFC na estimação da produtividade florestal, as redes que consideram os fatores climáticos permitem melhor análise da influência desses fatores na produtividade. A utilização dessas redes também

possibilita a estimação da produtividade em locais sem dados de inventário ou que não possuem plantios (Alcântara *et al.*, 2018).

A utilização de variáveis ambientais, somadas aos dados de IFC, como variáveis de entrada numa RNA, é importante, pois considera os efeitos naturais atípicos, como um ano com alto déficit hídrico, além de poder simular previsões de comportamentos fora do padrão (Alcântara, 2018; Freitas *et. al.* 2020).

Em relação às melhores configurações das RNA, assim como nesse estudo, outros trabalhos têm demonstrado melhor desempenho do algoritmo Resilient Propagation na resolução de problemas florestais. Freitas *et. al.* (2020) também observaram bom desempenho desse algoritmo para estimar a produtividade do eucalipto em função das variáveis ambientais e edáficas.

A porcentagem dos dados usada para o treinamento da rede influenciou a precisão da estimativa e associação entre os valores estimados e observados na validação. À medida que os dados utilizados no treino foram reduzidos, houve aumento da REQM (%) e redução da  $r_{yy}$ . A necessidade de maior porcentagem de dados para o treinamento (80, 85 e 90%) pode ser devido ao grande número de variáveis de entrada, abrangendo, assim, a maior variabilidade delas, e melhorando a capacidade da rede em generalizar. O mesmo foi observado por Alcântara *et al.* (2018) e Freitas *et al.* (2020), que utilizaram dados climáticos, além das variáveis categóricas (clone, espaçamento, idade, rotação, solo predominante), para estimar o IMA de povoamentos de eucalipto em Minas Gerais. Estes autores recomendam a utilização de toda a base de dados, quando as variáveis de entrada não possuem dados do IFC, para gerar estimativas melhores.

Com a maior utilização do banco de dados para o treino das redes, as mesmas apresentaram boa precisão da estimativa do IMA6 e correlação com os dados observados, considerando que não foram utilizados dados do IFC como variáveis preditoras, e que os dados utilizados foram em nível de talhão. Alcântara *et al* (2018), sem utilizar dados de IFC como variáveis preditoras, obteve redes com a REQM de 12 % no treinamento e 22 % na validação, utilizando 90 % dos dados para o treinamento, já a correlação na validação foi de aproximadamente 54 %. Estes valores são inferiores aos encontrados neste trabalho, o que comprova que a adição das variáveis veranico, *El nino* e *La nina*, melhoram a precisão e tem grande influência na produtividade florestal.

Nesse sentido é interessante considerar os fatores climáticos anuais somados aos números de veranicos e fenômenos *El nino* e *La nina*, uma vez que ao considerar somente as medias anuais climatológicas, uma alteração da produtividade florestal causada por algum

extremo climático em um determinado período do ano poderá ser atribuída erroneamente a outros fatores.

Entender a influência das mudanças nos padrões climáticos na produtividade florestal possibilita ao gestor florestal escolher a melhor localização para o plantio, selecionar os melhores genótipos para determinada condição, e manejar as florestas de modo a aproveitar melhor os recursos disponíveis.

#### 4. Conclusão

A utilização de RNA possibilita a estimação do IMA6 de povoamentos de eucalipto através de variáveis climáticas com boa precisão, apesar da complexidade dos dados, incluindo muitas variáveis.

Entre as variáveis explicativas que possuem maior importância para a estimação da produtividade do eucalipto ao final da rotação, destacam-se os veranicos e fenômenos *El nino* e *La nina*.

#### 5. Referências bibliográficas

- Alcântara, A. E. M.; Santos, A. C. A.; Silva, M. L. M.; Binoti, D. H. B.; Soares, C. P. B.; Gleriani, J. M.; Leite, H. G. 2018. Use of artificial neural networks to assess yield projection and average production of eucalyptus stands. *African Journal of Agricultural Research*. Vol. 13(42), pp. 2285-2297. <https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12942>
- Aceituno, P. 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector: Part I. surface climate. *Monthly Weather Review*, 166: 505–524, 1988.
- Asner, G.P.; Townsend, A.R.; Braswell, B.H. Satellite observation of El Niño effects on Amazon forest phenology and productivity. *Geophys Res Lett*, v.27, p.981-84, 2000.
- Barichivich, J.; Sauchyn, D.J.; Lara, A. 2009. Climate signals in high elevation tree-rings from the semiarid Andes of north-central Chile: Responses to regional and large-scale variability. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 281, p.320–333. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.033>
- Barros, N.F.; Comerford, N. B Sustentabilidade d Produção de Florestas Plantadas na Região Tropical. pp. 487-592. In: Tópicos em Ciência do Solo (Topics in Soil Science) - Vol. II. Sociedade Brasileira Ciência Solo, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 2002.
- Berger, R.; Schneider, P.R.; Finger, C.A.G.; Haselein, C.R. 2002. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. *Ciência Florestal*, v.12, n.2, p.75-87.
- Binoti, M.L.M.S.; Leite, H.G.; Binoti, D.H.B.; Gleriani, J.M. 2015. Prognose em nível de povoamento de clones de eucalipto empregando redes neurais artificiais. *Cerne*, v. 21, n. 1, p. 97-105. <https://doi.org/10.1590/01047760201521011153>

Booth, T. H. Eucalypt plantations and climate change. *Forest Ecology and Management*, v. 301, p. 28-34, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.004>

Campoe, O. C.; Munhoz, J. S. B.; Alvares, C. A.; Carneiro, R. L.; De Mattos, E. M.; Ferez, A. P. C.; Stape, J. L. 2016. Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 380, p. 149-160. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.048>

Campos, B. P. F.; Da silva, G. F.; Binoti, D. H. B.; De Mendonça, A. R.; Leite, H. G. 2016. Predição da altura total de árvores em plantios de diferentes espécies por meio de redes neurais artificiais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v.3, n.88, p.375-385. <http://dx.doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.1166>

Cera, J.C.; Ferraz, S. E.T. 2015. Variações climáticas na precipitação no Sul do Brasil no clima presente e futuro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, n. 1, 81 - 88. <https://doi.org/10.1590/0102-778620130588>

Christina, M.; Le maire, G.; Battie-laclau, P.; Nouvellon, Y.; Bouillet, J.-P.; Jourdan, C.; Gonçalves, J. L. D. M.; Laclau, J.-P. 2015. Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. *Global change biology*, v. 21, n. 5, p. 2022-2039.

Coelho, C.A.S.; Ambrizzi, T. Determinação dos padrões de precipitação sobre a América do Sul em associação a TSM da Bacia do Pacífico equatorial durante períodos extremos de ENOS através da utilização de técnicas estatísticas multivariadas. In: congresso brasileiro de meteorologia, 11, 2000, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: SBMET, 2000. 1 CD-ROM.

Freitas, E. C. S.; Paiva, H. N.; Neves, J. C. L.; Marcatti, G. E.; Leire, H. G. 2020. Modeling of eucalyptus productivity with artificial neural networks. *Industrial Crops and Products* v.146, April 2020, 112149. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112149>

Foley J. A, Botta A, Coe M.T. 2002. El Niño–Southern oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia. *Global Biogeochem Cycles*, v. 16 p.1132. <https://doi.org/10.1029/2002GB001872>

Fontana, D.C.; Berlato, M.A. 1996. Relação entre El Niño Oscilação Sul (ENOS), precipitação e rendimento do milho no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v.2, p.39- 46.

Grimm, A.M. 2004. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? *Climate Dynamics*, 22: 123.

Grimm, A.M.; Barros, V.R.; Doyle, M.E. 2000. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 13: 35-58.

Ibá. Performance indicators for the Brazilian planted tree sector, base year 2019. Brasília: Brazilian Tree Industry, 2020, p.66.

Maestri, R.; Sanquetta, C. R.; Scolforo, J. R.; Machado, S. A.; Corte, A. P. D. 2013 Modelagem do crescimento florestal considerando variáveis do ambiente: revisão. *Scientia Agraria*, v.14, n.3, p.103-110. <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v14i3.40908>

Marengo, J.A. 2006. On the hydrological cycle of the Amazon basin: a historical review and current state-of-the-art. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21: 1-19.

Martins, E.R.; Binoti, M. L. M.S.; Leite, H. G.; Binoti, D. H. B.; Dutra, G. C. 2016. Configuração de redes neurais artificiais para estimação da altura total de árvores de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.11, n.2, p.117-123.

Martinkoski, L.; Vogel, G. F.; Jadoski, S. O. 2015. Influência do clima no crescimento diamétrico de *Araucária angustifolia*: revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, v. 8, n. 2, p.104-111. <https://doi.org/10.5935/PAeT.V8.N2.12>

Otto, M.S.G.; Hubbard,R.M.; Binkley,D.; Stape, J.L. 2014. Dominant clonal *Eucalyptus grandis* x *urophylla* trees use water more efficiently. *Forest Ecology and Management*, v.328, p.117–121.

Ozçelik, R.; Diamantopoulou, M. J.; Brooks, J. R.; Wiant, H. V. 2010. Estimating tree bole volume using artificial neural network models for four species in Turkey. *Journal of environmental management*, v.91, n.3, p.742-753.

Sette Jr, C.R.; Tomazello Filho, M.; Dias, C.T.S.; Laclau, J.P. 2010. Crescimento em diâmetro do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill. ex. Maiden e relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. *Revista Árvore*, v.34, n.6, p.979-990.

Silva Ribeiro, R. B.; Gama, J. R. V.; De Souza, A. L.; Leite, H. G.; Soares, C. P. B.; Silva, G. F. 2016. Métodos para estimar o volume de fustes e galhos na Floresta Nacional do Tapajós. *Revista Árvore*, v. 40, n. 1, p. 81-88.

Stape, J.L.; Ryan, M.G. & Binkley, D. 2004. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. *Forest Ecology and Management*, 193:219-234.

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. D. A.; Lima, A. M. N.; Gava, J. L.; LEITE, F. P.; Andrade, H. B.; Alves, J. M.; Silva, G. G. C.; Azevedo, M. R. 2010. 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.

Vahedi, A. A. 2017. Monitoring soil carbon pool in the Hyrcanian coastal plain forest of Iran: Artificial neural network application in comparison with developing traditional models. *Catena*, v.152, p.182-189.

## ANEXOS

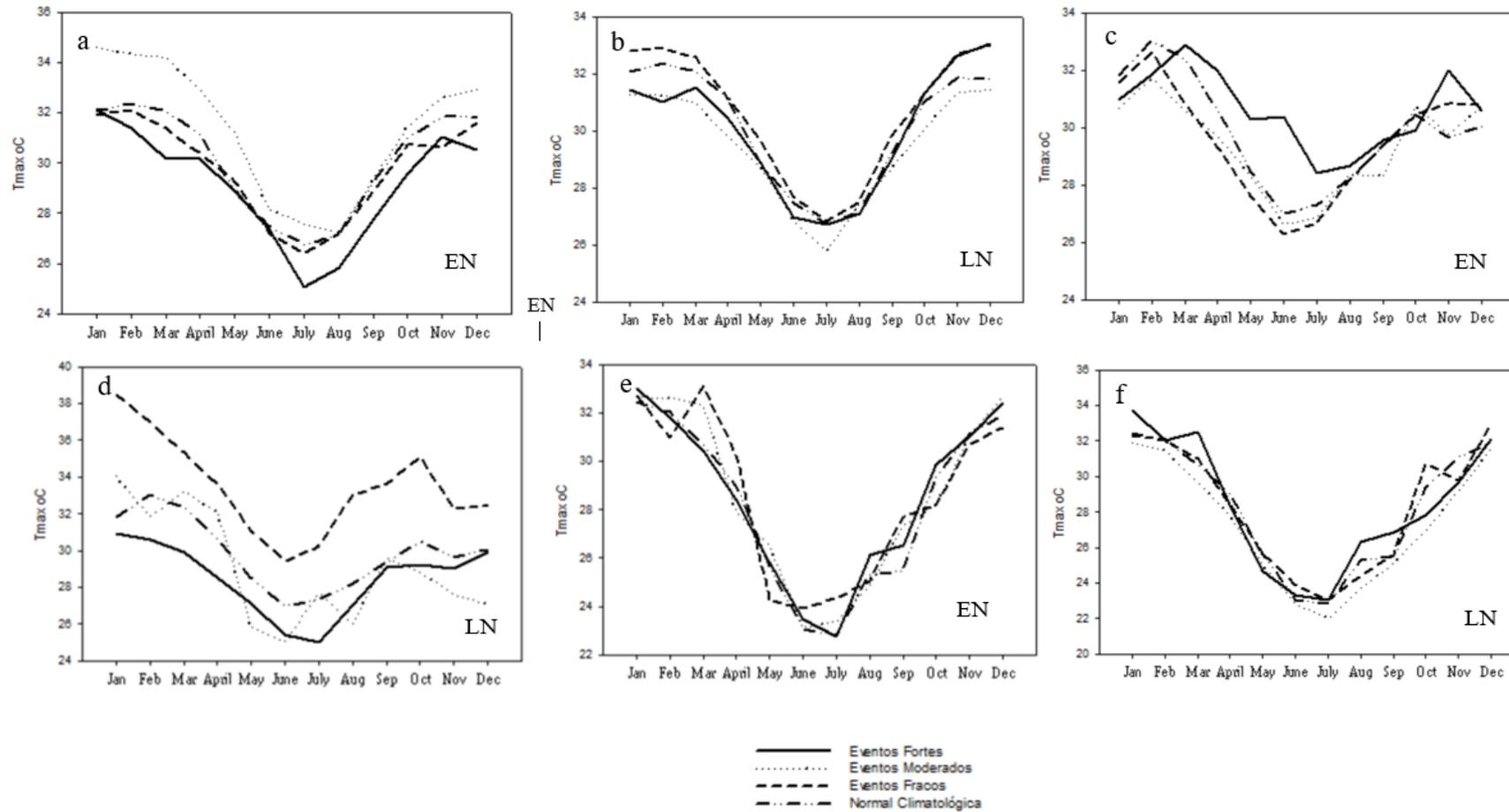
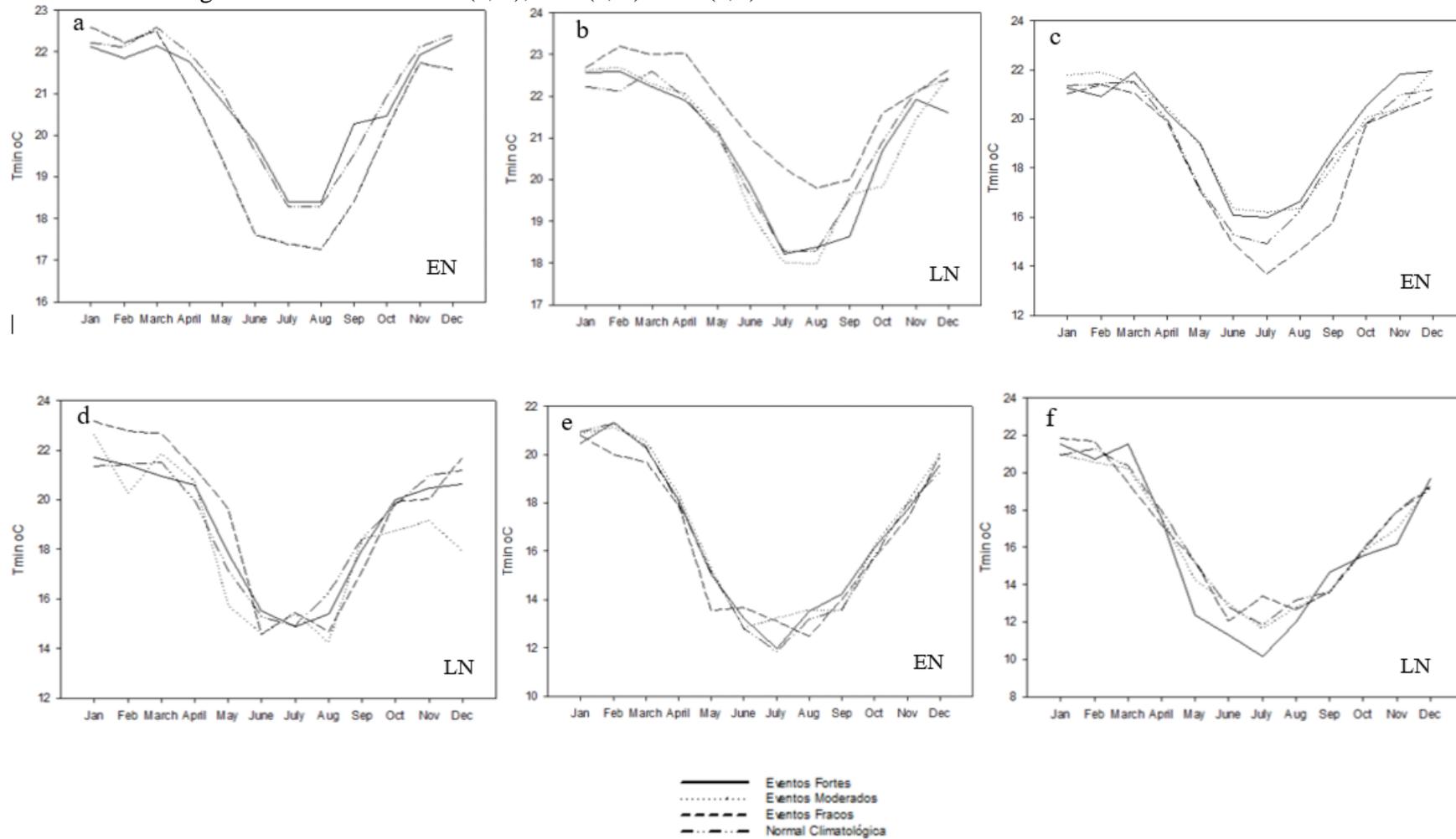


Figura 1. Caracterização das medias mensais de temperatura máxima em eventos: fraco, moderado e forte do El Niño (EN) e da La Niña (LN) e as normais climatológicas nos estados da BA (a, b), MG (c, d) e RS (e, f).

Figura 2. Caracterização das medias mensais de temperatura mínima em eventos: fraco, moderado e forte do El Niño (EN) e da La Niña (LN) e as normais climatológicas nos estados da BA (a, b), MG (c, d) e RS (e, f).



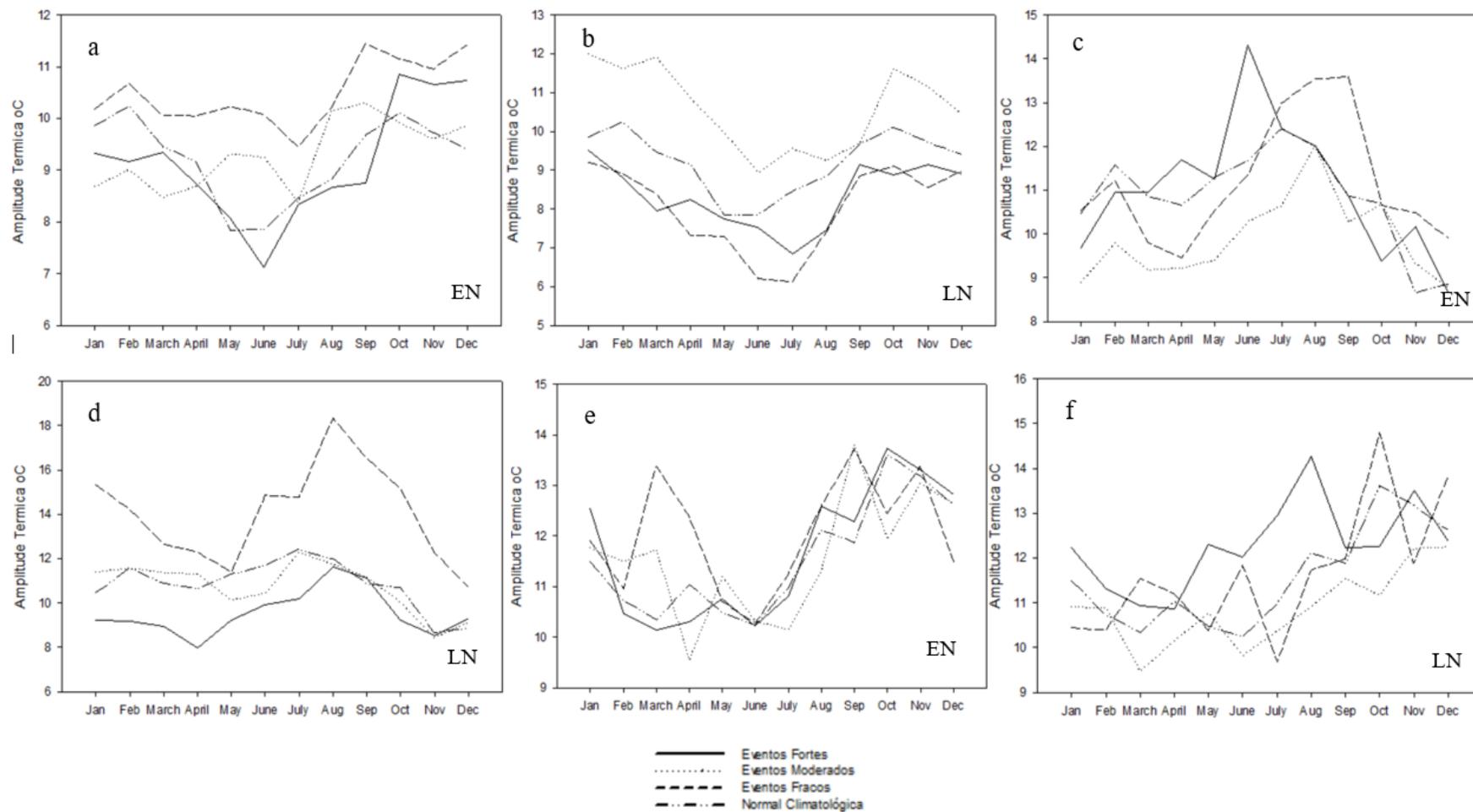


Figura 3. Caracterização das medias mensais de amplitude térmica em eventos: fraco, moderado e forte do El Niño (EN) e da La Niña (LN) e as normais climatológicas nos estados da BA (a, b), MG (c, d) e RS (e, f).

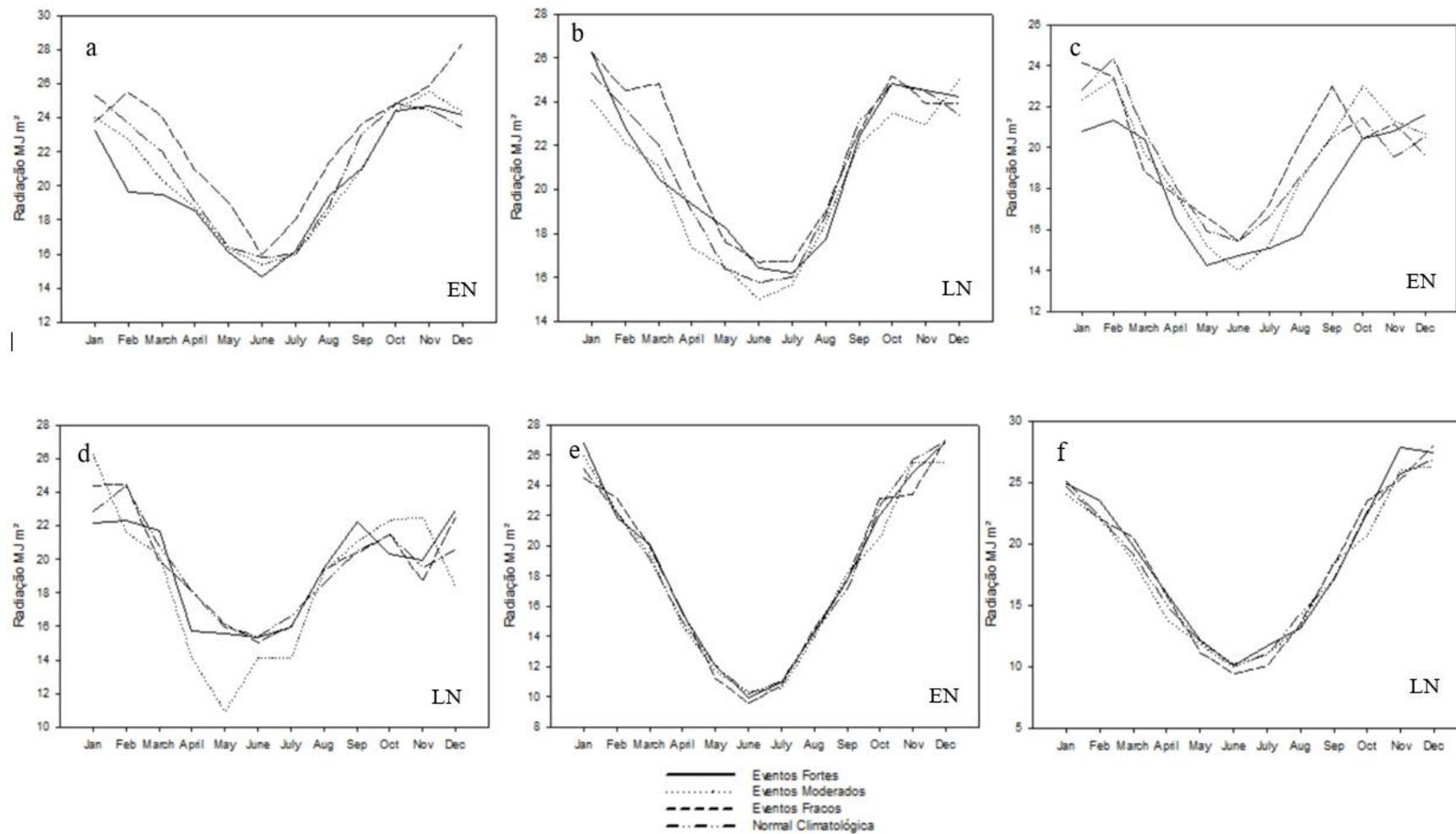
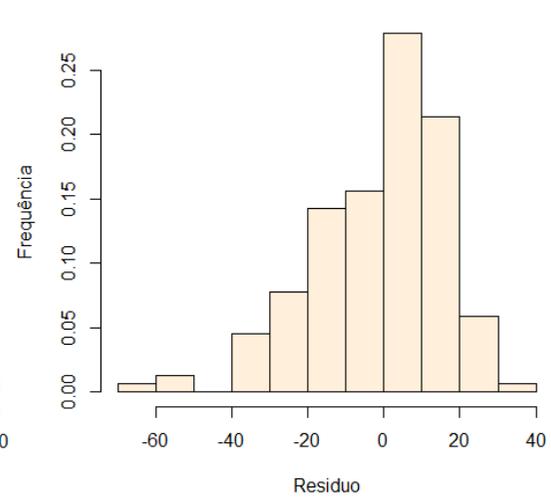
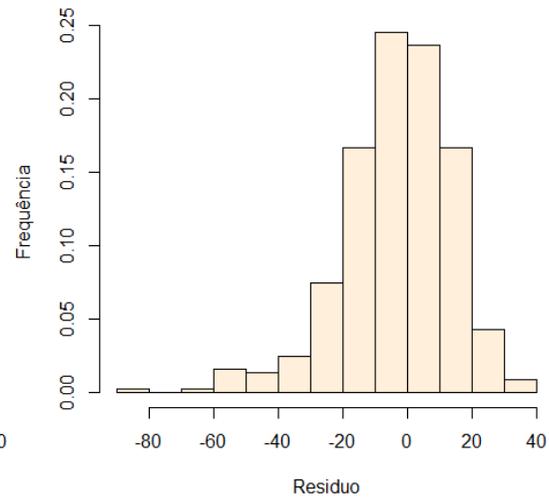
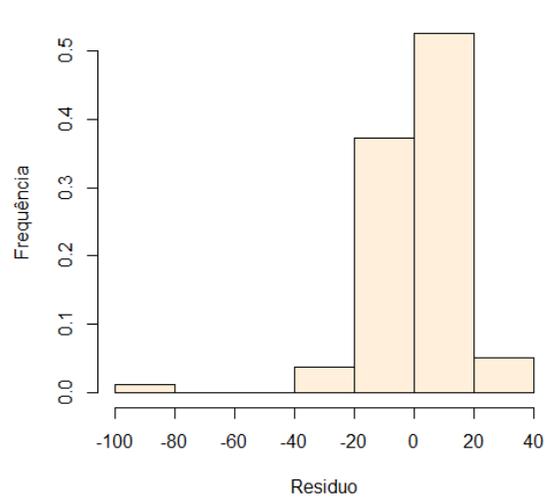
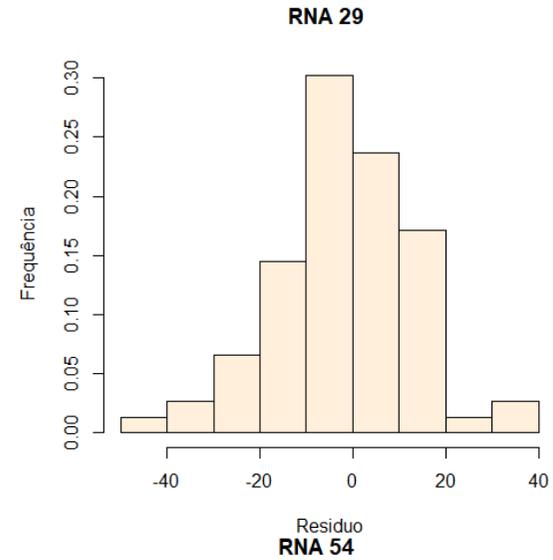
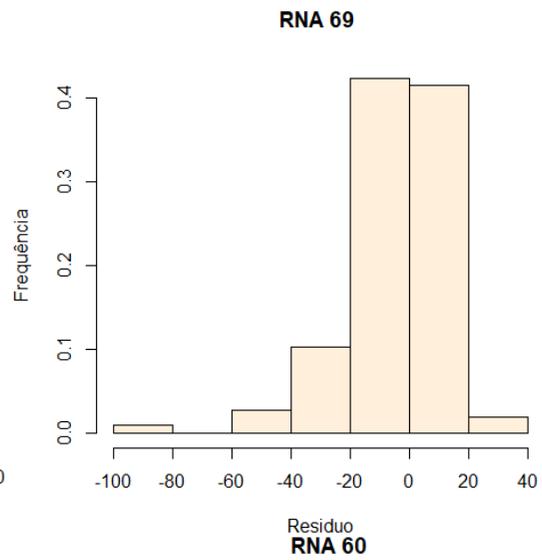
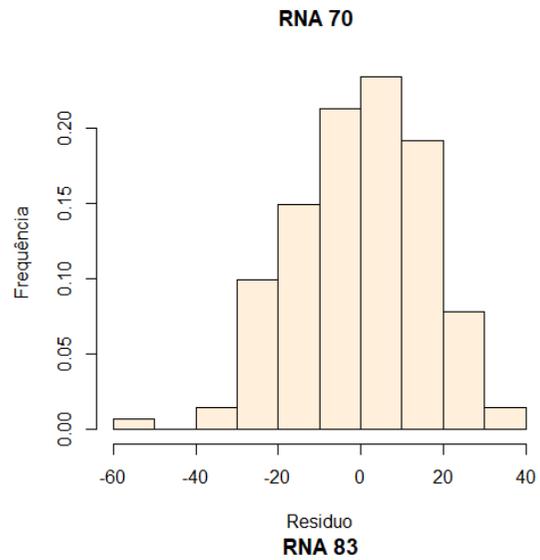


Figura 4. Caracterização das medias mensais de radiação solar em eventos: fraco, moderado e forte do El Niño (EN) e da La Niña (LN) e as normais climatológicas nos estados da BA (a, b), MG (c, d) e RS (e, f).



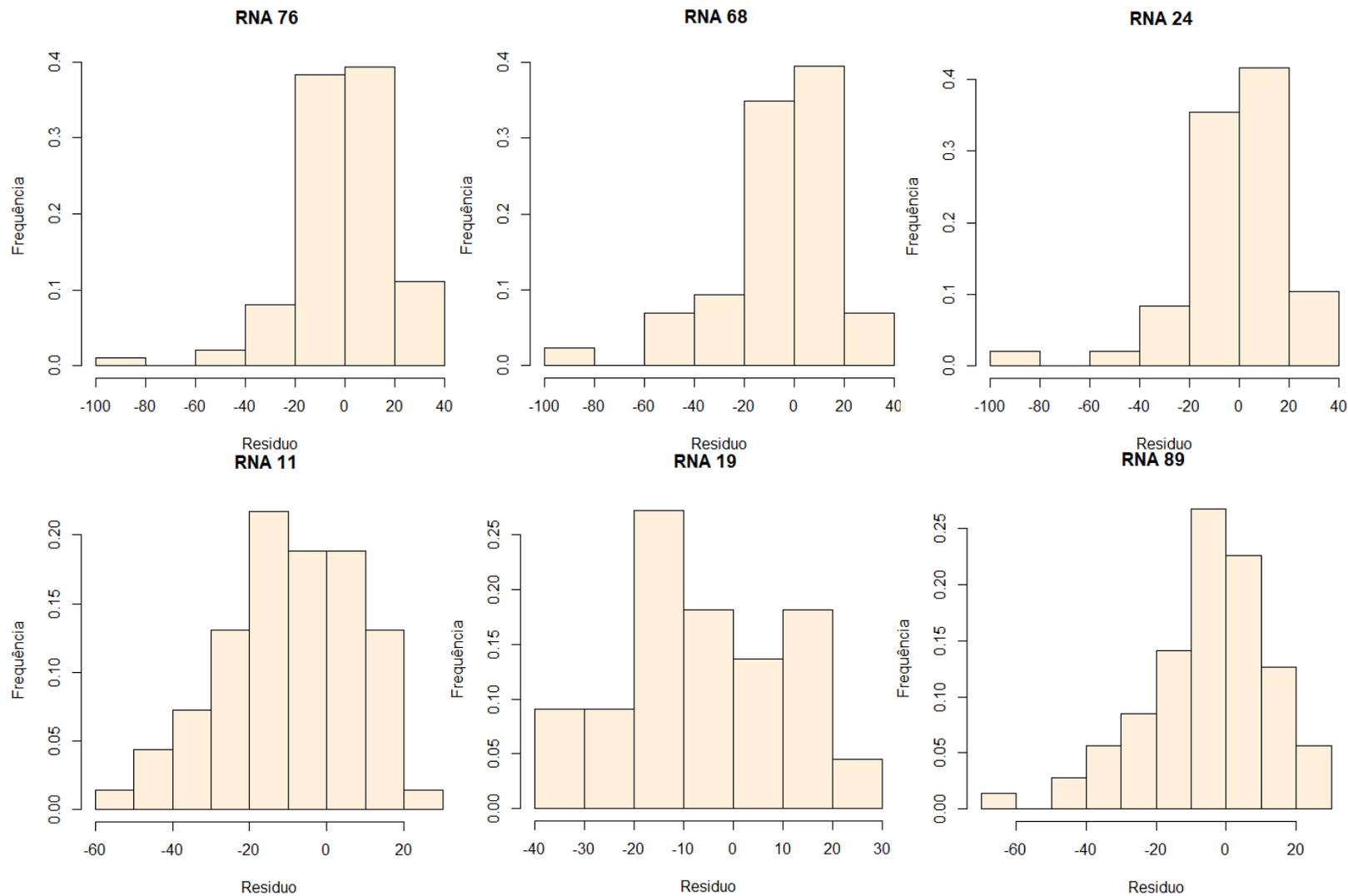


Figura 5 – Frequência relativa por classe do erro percentual das estimativas de IMA6 obtidos com os dados de validação.