

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

Simulação da produtividade potencial do *Eucaliptus globulus* Labill. e da *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. na América do Sul utilizando 3PG e machine learning

Denise Kubilius Suyama
Cientista da Computação

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

Simulação da produtividade potencial do *Eucalyptus globulus* Labill. e da *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. na América do Sul utilizando 3PG e machine learning

Denise Kubilius Suyama

Orientador: Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim

Coorientadores: Dra. Maria Teresa Vilela Nogueira Abdo

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

S967s	Suyama, Denise Kubilius Simulação da produtividade potencial d <i>Eucalyptus globulus</i> Labill. e da <i>Hevea brasiliensis</i> Müll. Arg. na América do Sul utilizando 3PG e machine learning / Denise Kubilius Suyama. – Jaboticabal, 2025 47 p. : Il., tabs., mapas Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Glauco de Souza Rolim Coorientadora: Maria Teresa Vilela Nogueira Abdo 1. Produtividade Florestal. 2. Eucalipto. 3. Seringueira. 4. Modelagem Computacional. 5. Machine Learning. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL DO *Eucalyptus Globulus* E DA *Hevea brasiliensis* Müll.Arg. NA AMÉRICA DO SUL UTILIZANDO 3PG E MACHINE LEARNING

AUTORA: DENISE KUBILIUS SUYAMA

ORIENTADOR: GLAUCO DE SOUZA ROLIM

COORIENTADORA: MARIA TERESA VILELA NOGUEIRA ABDO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM (Participação Presencial)
Departamento de Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
JOZRAEL HENRIQUES REZENDE
Data: 14/10/2025 14:38:49-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. JOZRAEL HENRIQUES REZENDE (Participação Virtual)
Departamento de Meio Ambiente e Recursos Hídricos / Faculdade de Tecnologia de Jahu (Fatec) - Jaú/SP



Documento assinado digitalmente
PAULO JORGE DE OLIVEIRA PONTE DE SOUZA
Data: 14/10/2025 21:27:45-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. PAULO JORGE DE OLIVEIRA PONTE DE SOUZA (Participação Virtual)
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) / Belém/PA

Jaboticabal, 03 de outubro de 2025

Denise Kubilius Suyama é filha de Sadao Suyama e Vera Tereza Kubilius Suyama, nascida em 07 de abril de 1976, na cidade de São Caetano do Sul (SP). É graduada em Ciências da Computação pela Universidade de São Caetano do Sul, concluída em 1997. Durante a graduação, realizou estágios no Banco Itaú e na IBM, sendo efetivada nesta última em 1996.

Atuou por 17 anos na área de Tecnologia da Informação, sendo 10 deles dedicados à Ciência de Dados aplicada a bancos.

Em 2021 e 2022, realizou diversos cursos no SENAR de São José do Rio Preto, dentre eles, Turismo Rural e Produção Orgânica de Tomates.

Em 2023, iniciou o Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) na UNESP - Câmpus de Jaboticabal, na linha de pesquisa em Agricultura Digital, com foco na modelagem de produtividade de espécies arbóreas, como eucalipto e seringueira, sob orientação do Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim. Integrante do grupo de pesquisa "Group of Agrometeorological Studies" (GAS) da UNESP Jaboticabal. Em outubro de 2025, realizou a defesa de sua dissertação de mestrado.

“O fim de algo é sempre a abertura silenciosa para
um novo começo”

Lama Padma Samten

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo à meus pais (*in memoriam*) que me deram essa vida humana rara e preciosa, me ensinaram, apoiaram desde sempre. E, mesmo já estando em outro plano, talvez até outra vida sei que torceram muito por mim nessa jornada.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim, pela paciência, dedicação e por me guiar com sabedoria e firmeza ao longo deste processo.

Agradeço também a co-orientadora Dra Maria Teresa Vilela Nogueira Abdo que também com paciência e dedicação me auxiliou muito em todo o processo e à Dra. Elaine Cristine Piffer Gonçalves.

Agradeço aos colegas e amigos do grupo GAS que compartilharam risadas, cafés e desabafos durante a pós-graduação, meu muito obrigado pela parceria e por tornarem esta jornada mais leve.

Agradeço à secretária do departamento Adriana Takakura e a Shirley que sempre foram solícitas, educadas e muito prestativas, sem elas, o departamento de Ciências Exatas não seria o mesmo.

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

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram com palavras de incentivo, gestos de carinho e apoio sincero, tornando possível a realização deste sonho.

Sumário

CAPÍTULO 1 - Considerações Gerais	5
1.1 Introdução.....	5
1.2 Revisão de literatura	7
1.2.1. Modelagem de espécies arbóreas	7
Referências	8
CAPÍTULO 2 - 3PG Tuning: Módulo em Python do modelo 3PG para calibração de parâmetros de espécies arbóreas	8
Resumo	10
2.2 Material e métodos.....	14
2.2.1 Desenvolvimento da ferramenta de calibração de parâmetros	14
2.2.2 3PG Prediction - simulação do crescimento de espécies	15
2.2.4 Exemplo de utilização.....	20
2.4 Resultados e discussão	21
2.5 Conclusão	25
Software availability	26
Referências	26
CAPÍTULO 3 – Produtividade Potencial de Carbono da Seringueira (<i>Hevea brasiliensis</i> Müll. Arg.) para a América do Sul utilizando o modelo 3PG	28
Resumo	28
3.1 Introdução	30
3.2 Material e métodos.....	31
3.2.1 Obtenção e processamento de dados climáticos	31
3.2.2 Modelo 3PG.....	33
3.2.3 Cálculo da biomassa	34
3.2.4 Estimativa da produção do Látex e carbono fixado na parte aérea... ..	36
3.3 Resultados e discussão.....	37
3.4 Conclusão	42
Referências	42
CAPÍTULO 4 – Considerações Finais	47

Lista de Tabelas

Tabela 1 -Parâmetros do modelo 3PG, incluindo relações alométricas, modificadores ambientais, características do dossel, e propriedades da biomassa, empregados para a simulação dinâmica do crescimento e desenvolvimento floresta- (Sands ,2002).	16
Tabela 2 - Exemplos de parâmetros para o tuning, sendo: min Val = valor mínimo a ser testado,, max val =valor máximo a ser testado, Step = de quanto em quanto sera testado, Tmin = temperatura mínima , Topt= temperatura ótima, Tmax= temperatura máxima, k= coeficiente de extinção da luz	20
Tabela 3 - Resultado obtido com os parâmetros de temperatura mínima (Tmin), ótima (Topt), máxima (Tmax) e coeficiente de extinção da radiação (k) com o melhor valor de R ² ajustado na calibração do modelo 3PG.	22

Lista de figuras

Figura 1 - Coeficiente de determinação ajustado (R ²) avaliado ao longo das iterações durante a calibração do modelo 3PG.....	21
Figura 2 - Comparação entre os resultados simulados para o Eucalipto pelo modelo 3PG com dados observados para a floresta de Leiria de Portugal da biomassa acima do solo, biomassa da madeira, biomassa das folhas, biomassa das raízes, área basal total, volume sob casca e índice de área foliar (LAI). Em verde os dados observados e em vermelho os valores simulados. ...	23
Figura 3. Modificadores de efeitos da temperatura, evapotranspiração, precipitação, nutrição, dias com geada e idade da planta, onde valores próximos a 1 indicam ausência de influência negativa e valores próximos a 0 indicam forte limitação no crescimento do eucalipto para no período entre 6 e 18 anos da planta.	25
Figura 4. Modificadores de efeitos da temperatura, evapotranspiração, precipitação, nutrição, dias com geada e idade da planta ao longo de 1 ano médio.....	25
Figura 5. Mapa dos 7000 pontos com raio de 55 km extraídos do sistema NASA Power.....	32
Figura 6 - Fluxograma do Physiological Principles Predicting Growth - 3 PG (Landberg e Waring, 1997).....	33
Figura 7 - Agrupamento climático para a América do Sul feito através do K-MEANS.	38
Figura 8. A) Produtividade potencial (PP), B) produtividade atingível (PA) e C) Diferença entre a produtividade potencial e atingível (PP-PA).	40
Figura 9 - A) Fixação Potencial de carbono (FPC), B) Fixação Atingível (FAC) e C) Diferença entre a FPC e FAC (FPC - FAC).	41

SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL DO *Eucalyptus globulus* Labill. E DA *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. NA AMÉRICA DO SUL UTILIZANDO 3PG E MACHINE LEARNING

Resumo – As florestas desempenham um papel essencial no ciclo hidrológico, no sequestro de carbono e na conservação da biodiversidade. A modelagem de sistemas florestais é uma ferramenta estratégica para o manejo sustentável, pois integra informações genéticas das espécies com dados climáticos e edáficos. Entre os modelos ecofisiológicos existentes, o 3PG (*Physiological Principles for Predicting Growth*) destaca-se por sua ampla aplicação na simulação do crescimento e da produtividade de espécies arbóreas, embora dependa de parâmetros específicos nem sempre disponíveis na literatura. Para suprir essa lacuna, este trabalho desenvolveu uma versão do modelo 3PG em Python, incorporando um módulo de calibração automática de parâmetros (3PG Tuning) baseado no método de força bruta. A simulação inicial foi conduzida para *Eucalyptus globulus* Labill., utilizando dados da Mata Nacional de Leiria (Portugal) e uma série climática de 1981 a 2003, obtendo R^2 ajustado de 0,99 (parte aérea), 0,95 (folhas) e 0,96 (raiz). Esses resultados demonstram a eficiência do 3PG para estimar a produtividade de biomassa e o sequestro de carbono em espécies florestais. A partir dessa versão em Python, foram calibrados os parâmetros de temperatura mínima, máxima e ótima, além do valor k , para a seringueira (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.). Essa espécie, nativa da Amazônia, é a principal fonte de látex utilizado em pneus, luvas e diversos outros produtos. Apesar de sua origem brasileira, cerca de 89% da produção mundial de borracha natural provém da Ásia, reflexo do baixo incentivo econômico ao cultivo no Brasil. Nesse contexto, estimar a produtividade da biomassa e o potencial de sequestro de carbono surge como alternativa para valorizar a cultura, sobretudo considerando que a seringueira fixa mais carbono que o eucalipto e o cacauieiro, contribuindo para políticas públicas que busquem remunerar o produtor de látex pelos serviços ecossistêmicos prestados. Foram então, utilizando o modelo 3PG com os parâmetros da seringueira, estimados a biomassa potencial e atingível, bem como, o sequestro de carbono. Os resultados para a estimação de biomassa atingível nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, além de parte do Centro-Oeste e áreas da Colômbia e Venezuela, variaram entre 109,3 e 218,3 t ha⁻¹. Nessas localidades, as temperaturas médias anuais situam-se entre 17 °C e 26 °C, e a precipitação anual varia de 1.289 a 2.127 mm. Quanto ao sequestro de carbono, os valores estimados variaram entre 57 e 109,2 t ha⁻¹ em regiões do norte da Argentina, Brasil (norte, centro-oeste, sul e sudeste), Colômbia e Venezuela.

Palavras-chave: Modelagem ecofisiológica; 3PG; calibração de parâmetros; sequestro de carbono; seringueira;

Modeling the Potential Productivity of *Eucalyptus globulus* Labill. and *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. in South America Through 3PG and Machine Learning Approaches

Abstract - Forests play an essential role in the hydrological cycle, carbon sequestration, and biodiversity conservation. Forest system modeling is a strategic tool for sustainable management as it integrates species genetic information with climatic and edaphic data. Among existing ecophysiological models, 3PG (Physiological Principles for Predicting Growth) model stands out for its broad applicability in simulating growth and productivity of tree species, although it relies on species-specific parameters that are not always available in literature. To address this gap, the present study developed a Python-based version of 3PG model, incorporating an automatic parameter calibration module (3PG Tuning) using the brute-force method. The initial simulation was conducted for *Eucalyptus globulus* Labill., using data from the Leiria National Forest (Portugal) and a climatic series from 1981 to 2003, yielding adjusted R^2 values of 0.99 (aboveground biomass), 0.95 (leaves), and 0.96 (roots). These results demonstrate the efficiency of 3PG Tuning in estimating biomass productivity and carbon sequestration in forest species. Based on this Python version, the parameters of minimum, maximum, and optimum temperature, as well as the k value, were calibrated for rubber tree (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.). This species, from Amazon region is the primary source of natural latex used in tires, gloves, and several other products. Despite its Brazilian origin, about 89% of global natural rubber production occurs in reflecting the low economic incentive for this tropical tree crop in Brazil. In this context, estimating biomass yield and carbon sequestration emerges as an alternative to enhance the crop's value, especially considering that rubber trees sequester more carbon than eucalyptus and cacao supporting public policies aimed at compensating latex producers for the ecosystem services provided. The attainable biomass estimates for the southern and southeastern regions of Brazil, as well as parts of the central-west, Colombia, and Venezuela, ranged from 109.3 to 218.3 t ha⁻¹. In these regions, mean annual temperatures vary between 17 °C and 26 °C, and annual precipitation ranges from 1,289 to 2,127 mm. Regarding carbon sequestration estimated values ranged from 109.3 to 218.3 t ha⁻¹ across northern Argentina, Brazil (north, central-west, south, and southeast), Colombia, and Venezuela.

Keywords: ecophysiological modeling; 3PG model; parameter calibration;

CAPÍTULO 1 - Considerações Gerais

1.1 Introdução

O monitoramento e a modelagem do crescimento de espécies florestais desempenham um papel essencial no manejo sustentável dos recursos naturais e na mitigação das mudanças climáticas. A utilização de modelos ecofisiológicos permitem compreender e prever a dinâmica do crescimento vegetal a partir de processos fisiológicos, integrando variáveis climáticas, edáficas e genéticas. Essas ferramentas são comumente utilizadas para estimar produtividade, biomassa e sequestro de carbono em diferentes regiões e condições ambientais, auxiliando no planejamento e na formulação de políticas de uso sustentável do solo.

Para espécies florestais o modelo mais utilizado é o 3PG (Physiological Principles for Predicting Growth). Por meio da inserção de dados climáticos, tipo de solo e parâmetros fisiológicos específicos, o modelo 3PG permite simular o crescimento ao longo do tempo e realizar projeções de produtividade (FERREIRA et al., 2018). Diversas espécies são aceitas pelo modelo, para o *Eucalyptus globulus* Labill., por exemplo, o 3PG em sua versão em Excel, tem sido empregado com o objetivo de estimar a produtividade de biomassa. Esses resultados auxiliam no planejamento florestal e na definição de estratégias de manejo sustentáveis e economicamente viáveis.

Com os avanços tecnológicos e a ampla utilização de ferramentas computacionais na área ambiental, diversas versões do modelo 3PG foram adaptadas para linguagens de programação modernas, como o Python (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2024). Por ser uma linguagem de programação de código aberto e executável em diversas plataformas e de fácil compreensão, o Python oferece maior flexibilidade na parametrização e permite simulações em larga escala, além de possibilitar a integração com bibliotecas científicas, bancos de dados meteorológicos e sistemas de geoprocessamento (Costa et al., 2021).

O uso do 3PG em Python ainda favorece análises estatísticas, avaliações de sensibilidade e calibração de parâmetros, ampliando o potencial do modelo em estudos florestais aplicados. O modelo possibilita também, simular a fixação de carbono através da fotossíntese e sua posterior alocação nos diversos compartimentos da planta, incluindo folhas, caule, raízes e o sistema de produção de látex (Silva et al, 2020). Essa abordagem contribui para o manejo mais eficiente do cultivo, permitindo prever o desempenho produtivo sob diferentes condições climáticas e edáficas, bem como estratégias de manejo.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi utilizar dados meteorológicos e o modelo 3PG, juntamente com algoritmos de aprendizado de máquina, para estimar o crescimento do eucalipto e comparar com dados de Portugal, a fim de testar o modelo

3PG na sua versão em Python. Além disso, o estudo buscou estimar o crescimento da seringueira e calcular o carbono sequestrado pela espécie, com vistas a subsidiar a criação de políticas públicas voltadas ao pagamento por serviços ambientais para os produtores de látex.

1.2 Revisão de literatura

Modelagem de espécies arbóreas

Atualmente, as mudanças climáticas representam um dos temas mais urgentes de preocupação global, resultantes do aumento das emissões de gases de efeito estufa, especialmente o dióxido de carbono, provenientes de atividades antrópicas (IPCC, 2022). As florestas tropicais desempenham papel essencial na regulação desse processo, armazenando mais carbono do que as florestas de zonas temperadas e frias (Pan et al., 2011; Zarin, 2012). Entretanto, o desmatamento e a degradação florestal em regiões tropicais são responsáveis por cerca de 6% a 15% das emissões globais anuais de gases de efeito estufa (Harris et al., 2021).

Desde a COP19, realizada em Varsóvia em 2013, o mecanismo REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation Plus*) vem sendo fortalecido como instrumento global para reduzir emissões por meio de incentivos econômicos, reconhecendo o papel das florestas no Acordo de Paris (UNFCCC, 2015). O REDD+ busca mobilizar recursos financeiros de países desenvolvidos para apoiar nações em desenvolvimento na mitigação das emissões decorrentes do desmatamento, utilizando mecanismos de mercado e pagamentos por serviços ambientais (PSA) (Angelsen et al., 2018).

Nesse sentido, abordagens baseadas em modelagem espacial e ecofisiológica vêm sendo propostas para estimar a produtividade e o sequestro de carbono de sistemas florestais e agroflorestais (SOTO-NAVARRO et al., 2020). Diversos estudos destacam o avanço do uso de modelos de simulação como o 3-PG (*Physiological Principles Predicting Growth*) e o WaNuLCAS (*Water, Nutrient and Light Capture in Agroforestry Systems*). O modelo WaNuLCAS, desenvolvido especificamente para sistemas agroflorestais, simula de forma integrada as interações entre árvores, solo e culturas agrícolas, considerando o balanço de água, nutrientes e luz (Van Noordwijk et al., 2004).

Já o modelo 3-PG, desenvolvido por Landsberg e Waring (1997), é um modelo ecofisiológico de base mecanicista que estima o crescimento e a produtividade de espécies florestais a partir de princípios fisiológicos simplificados. O 3PG tem sido amplamente utilizado para prever crescimento, biomassa e sequestro de carbono, apresentando desempenho consistente em diferentes regiões e condições climáticas (Gupta e Sharma, 2019; Sands, 2004). Estudos como Lemos et al. (2023) demonstram sua eficácia em plantações tropicais de *Eucalyptus urophylla*, enquanto Alvares et al. (2021) reforçam a importância da calibração dos parâmetros conforme a espécie e o ambiente local.

O modelo 3PG simula o balanço de carbono da vegetação com base na eficiência de uso da radiação (RUE), integrando variáveis meteorológicas, edáficas e genéticas em componentes de crescimento, como biomassa aérea, subterrânea e

alocação de carbono entre folhas, caule e raízes. Sua principal vantagem é a relação direta entre processos fisiológicos e fatores ambientais, o que permite avaliar os efeitos do clima e do manejo em diferentes cenários de mudança climática (Sands e Landsberg, 1997; Silva et al., 2023).

Além de sua ampla aplicação em espécies do gênero *Eucalyptus* spp. (DeLemos et al., 2023; Elli et al., 2020; Hakamada et al., 2025), o 3PG vem sendo estendido para novas espécies pela sua flexibilidade e capacidade de integração com grandes bases de dados climáticos, como a NASA-POWER, por meio de implementações em linguagem Python (Karki et al., 2023; Mckinney, 2010). Essa abordagem oferece suporte à formulação de estratégias sustentáveis de manejo florestal e valorização do carbono em ecossistemas produtivos.

Referências

de Lemos CZ, Carrero O, Hakamada R, Silva LF, Ferreira K, Stape JL (2023) 3-PG model enhancement by modifying soil water availability in a tropical *Eucalyptus urophylla* plantation. **Scientia Forestalis** 51:1–10.

Elli EF, Sentelhas PC, Bender FD (2020) Impacts and uncertainties of climate change projections on *Eucalyptus* plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management** 474:118365.

Griscom BW, Busch J, Cook-Patton SC, Ellis PW, Funk J, Leavitt SM, et al. (2020) National mitigation potential from natural climate solutions in the tropics. **Philosophical Transactions of the Royal Society B** 375(1794):20190126.

Gupta R, Sharma LK (2019) The process-based forest growth model 3-PG for use in forest management: a review. **Ecological Modelling** 397:55–73.

Hakamada R, Coronado JP, Falcão CJLM, Carrero O, Sulbarán-Rangel B (2025) 3PG model to estimate productivity, carbon storage and aridity index of *Eucalyptus* plantations in Mexico. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** 16(87):127–152.

Harris NL, Gibbs DA, Baccini A, Birdsey RA, De Bruin S, Farina M, et al. (2021) Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. **Nature Climate Change** 11:234–240.

IPCC (2022) Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the IPCC. **Cambridge University Press**, Cambridge.

Karki R, Qi J, Gonzalez-Benecke CA, Zhang X, Martin TA, Arnold JG (2023) SWAT-3PG: improving forest growth simulation with a process-based forest model in SWAT. **Environmental Modelling and Software** 164:105705.

Koh LP, Ghazoul J (2010) Spatially explicit scenario analysis for reconciling agricultural expansion, forest protection, and carbon conservation in Indonesia. **Proceedings of the National Academy of Sciences** 107(24):11140–11144.

Landsberg JJ, Waring RH (1997) A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management** 95:209–228.

Maggiotto SR, Oliveira D, Marur CJ, Stivari SMS, Leclerc M, Wagner-Riddle C (2014) Potencial de sequestro de carbono em seringais no noroeste do Paraná, Brasil. **Acta Scientiarum Agronomy** 36(2):239–245.

McKinney W (2010) Data structures for statistical computing in Python. **Proceedings of the 9th Python in Science Conference** 51–56.

Nepstad DC, Boyd W, Stickler CM, Bezerra T, Azevedo AA (2014) Responding to climate change and the global land crisis: REDD+, market transformation and low-emissions rural development. **Philosophical Transactions of the Royal Society B** 369(1639):20120273.

Pan Y, Birdsey RA, Fang J, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenko A, Lewis SL, Canadell JG, et al. (2011) **A large and persistent carbon sink in the world's forests**. *Science* 333(6045):988–993.

Sands P (2004) Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data collection and parameter assignment. **CRC for Sustainable Production Forestry**, Hobart, Australia.

Sands PJ, Landsberg JJ (1997) Parameterisation of 3-PG for plantation-grown *Eucalyptus globulus*. **CSIRO Forestry and Forest Products Technical Report**.

Satakhun D, Chayawat C, Sathornkich J, Phattaralerphong J, Chantuma P, Thaler P, et al. (2019) Carbon sequestration potential of rubber-tree plantation in Thailand. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 526:012036.

Silva GCC, Neves JCL, Marcatti GE, Soares CPB, Calegario N, Junior CAA, et al. (2023) Improving 3-PG calibration and parameterization using artificial neural networks. **Ecological Modelling** 479:110301.

Soto-Navarro C, Ravilious C, Arnell A, De Lamo X, Harfoot M, Hill SLL, et al. (2020) Mapping co-benefits for carbon storage and biodiversity to inform conservation policy and action. **Philosophical Transactions of the Royal Society B** 375(1794):20190128.

UNFCCC (2015) The Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change, Bonn.

Van Noordwijk M, Mardiyanto S, Husen E, Doran JW (2004) WaNuLCAS model: water, nutrient and light capture in agroforestry systems. In: Below-ground interactions in tropical agroecosystems: concepts and models. **CAB International, Wallingford, UK**, pp. 217–242.

Vijay V, Pimm SL, Jenkins CN, Smith SJ (2018) The impacts of oil palm on recent deforestation and biodiversity loss. **Global Environmental Change** 52:103–111.

Yang X, Blagodatsky S, Liu F, Beckschäfer P, Xu J, Cadisch G (2017) Rubber tree allometry, biomass partitioning and carbon stocks in mountainous landscapes of subtropical China. **Forest Ecology and Management** 404:84–99.

Zarin DJ (2012) Carbon from tropical deforestation. **Science** 336(6088):1518–1519.

CAPÍTULO 2 - 3PG Tuning: Módulo em Python do modelo 3PG para calibração de parâmetros de espécies arbóreas

Resumo - As florestas são componentes fundamentais dos ecossistemas, sendo responsáveis pela manutenção do ciclo hidrológico, pelo sequestro de carbono e pela preservação da biodiversidade. As condições climáticas influenciam o crescimento de diversas espécies arbóreas, e a modelagem de sistemas florestais é uma ferramenta essencial para o gerenciamento florestal. O modelo *Physiological Principles for Predicting Growth* (3PG) é um dos mais utilizados no mundo e emprega submodelos fisiológicos como a estimativa da interceptação da radiação fotossinteticamente ativa, o cálculo da fotossíntese, o balanço hídrico, mortalidade e autodesbaste nas simulações. O modelo 3PG utiliza um total de 50 a 72 parâmetros dependendo da implementação, entretanto, parâmetros específicos para cada espécie florestal são escassos na literatura. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma versão do 3PG na linguagem de programação Python para a calibração automática de parâmetros de crescimento de espécies florestais (3PG Tuning). Um script em Python (versão 3.11.9) foi desenvolvido para realizar a aproximação dos parâmetros por meio do método de seleção exaustiva (força bruta). A simulação do 3PG em Python foi realizada para *Eucalyptus globulus* Labill., utilizando dados observados do eucalipto da Mata Nacional de Leiria, em Portugal, e parâmetros calibrados pelo módulo 3PG Tuning. Os dados climáticos mensais de temperatura, radiação solar e precipitação correspondem à série histórica de 1981 a 2003. Os resultados da calibração do modelo apresentaram coeficientes de determinação (R^2) ajustados de 0,99, 0,98 e 0,96 para a biomassa da parte aérea, biomassa das folhas e biomassa da raiz, respectivamente. A ferramenta 3PG Tuning se mostra uma alternativa eficiente para a modelagem de espécies arbóreas com falta de parâmetros.

Palavras-chave: modelagem ecofisiológica; modelo mecanicista; ajuste de parâmetros; calibração; dados climáticos;

CHAPTER 2 - 3PG Tuning: Python module of the 3PG model for parameter calibration of tree species

Abstract - Forests are fundamental components of ecosystems, playing a crucial role in maintaining the hydrological cycle, sequestering carbon, and preserving biodiversity. Climatic conditions influence the growth of various tree species, and forest system modeling is an essential tool for forest management. The Physiological Principles for Predicting Growth (3PG) model is one of the most widely used worldwide and employs physiological submodels such as the estimation of photosynthetically active radiation interception, photosynthesis calculation, water balance, mortality, and self-thinning in its simulations. 3PG model requires a total of 50 to 72 parameters depending on the implementation; however, species-specific parameters are scarce in the literature. Therefore, the objective of this study was to develop a Python-based version of 3PG model to automate growth calibration of parameters in forest species (3PG Tuning). A Python script (version 3.11.9) was developed to approximate parameters using the exhaustive search (brute-force) method. 3PG simulation in Python was performed for *Eucalyptus globulus*, using observed data from Eucalyptus stands in the Leiria National Forest, Portugal, and parameters calibrated through 3PG Tuning module. Monthly climate data on temperature, solar radiation, and precipitation corresponded to the historical series from 1981 to 2003. The model calibration results showed adjusted determination coefficients (R^2) of 0.99, 0.98, and 0.96 for aboveground biomass, leaf biomass, and root biomass, respectively. 3PG Tuning tool proves to be an efficient alternative for modeling tree species with limited parameter availability.

Keywords: Ecophysiological modeling; Mechanistic model; Parameter tuning; calibration; Climate data.

2.1 Introdução

As florestas representam aproximadamente 31% da superfície terrestre, constituindo um dos principais componentes dos ecossistemas globais (Karki et al., 2025). Elas desempenham papéis fundamentais na manutenção do equilíbrio ecológico, conservação da biodiversidade, regulação do ciclo hidrológico e preservação de bacias hidrográficas (Gupta e Sharma, 2019). Além disso, são fontes importantes para a produção de madeira e bioenergia, influenciam a dinâmica de nutrientes no solo e contribuem significativamente para o armazenamento de nitrogênio e fósforo nos ecossistemas, representando de 28% a 38% do total armazenado (Song e Song, 2022). No ciclo de carbono, destacam-se pelo elevado potencial de sequestro de carbono, desempenhando um papel crucial na atenuação das mudanças climáticas (Karki et al., 2025).

A intensificação da variabilidade climática e dos eventos extremos, como secas e ondas de calor, influenciam fortemente fatores relacionados à disponibilidade hídrica, a degradação da qualidade da água e solo, além da perda de biodiversidade, afetando os processos fisiológicos das plantas (Karki et al., 2025). Nesse contexto, destaca-se a importância da compreensão das interações entre água, nutrientes e carbono, especialmente no contexto de alterações causadas por mudanças climáticas e intervenções humanas, para garantir uma produção florestal forte e flexível (IPCC, 2023).

Entre as variáveis críticas para avaliar os impactos das mudanças climáticas nas florestas, a quantificação da biomassa florestal é essencial, contribuindo diretamente para o desenvolvimento de políticas de mitigação destas mudanças (Karki et al., 2025). A quantificação da biomassa de uma área florestal é um processo complexo baseado em processos fisiológicos (Landsberg e Waring, 1997). As informações geradas influenciam em termos econômicos, sociais e de sustentabilidade ambiental (Silva et al., 2023). Portanto, para obter resultados acurados na determinação da produtividade de uma floresta é crucial compreender como as diferentes práticas de manejo e medidas ambientais que podem afetar a produtividade, lucratividade e a avaliação de riscos de um sistema florestal (Gupta e Sharma, 2019).

Para isso, estudos utilizam modelos computacionais baseados em processos fisiológicos das espécies e variáveis climáticas para avaliar o impacto das mudanças climáticas nessas espécies (Silva et al., 2023). Esses modelos apresentam diversificação nas variáveis de entrada necessárias para sua execução, parâmetros como partição de biomassa, modificadores de crescimento, além de processos fisiológicos específicos. Os resultados precisos dependem da compreensão na interação entre muitas variáveis de crescimento de cada espécie e seu genótipo, juntamente com as práticas de manejo florestal e as condições ambientais que impactam na produtividade (Restrepo et al., 2022). Desse modo, a modelagem tem aprimorado a produtividade das florestas e sua sustentabilidade ao longo dos anos (Silva et al., 2023).

O *Physiological Principles for Predicting Growth* (3PG) é um modelo baseado em processos fisiológicos como a fotossíntese bruta e líquida, introduzido por Landsberg e Waring (1997) que simula processos como absorção e transformação de radiação solar em biomassa, balanço hídrico, mortalidade de plantas e parâmetros dendrométricos (Silva et al., 2023). As simulações realizadas pelo modelo incorporam parâmetros alométricos específicos e idade da espécie e variáveis ambientais como temperatura, além de características do solo e disponibilidade hídrica (Song and Song, 2022; Landsberg and Waring, 1997). O 3PG mensura a produtividade da espécie florestal e é amplamente utilizado em diferentes setores produtivos ao redor do mundo devido a sua relativa simplicidade de aplicação (Gupta e Sharma, 2019).

Um dos cálculos principais do 3PG é a determinação da radiação fotossinteticamente absorvida (APAR), que é convertida em produtividade primária líquida (NPP). Essa produtividade é então distribuída entre raízes, folhas e tronco da espécie modelada (Landsberg e Waring, 1997; Gupta e Sharma, 2019). Os valores dos parâmetros dos cálculos para uma espécie devem ser atribuídos por meio de medições de dados observados ou por analogia com outras espécies semelhantes (SANDS, 2004), ou ainda por calibração de parâmetros, que pode ser realizada executando o modelo 3-PG diversas vezes até obter resultados próximos aos dados observados para a espécie (LANDSBERG and WARING, 1997; SILVA et al., 2023). Embora esse processo de calibração possa ser aplicado, ele apresenta limitações em

termos de desempenho computacional, computação paralela e otimização de parâmetros (SONG and SONG, 2022).

O Python (Python Software Foundation, 2024) é uma linguagem de programação em código aberto executado em diversas plataformas e que possui diversas bibliotecas. A programação é feita por meio de “*scripts*” onde devem ser importadas as bibliotecas necessárias para utilização de grandes conjuntos de dados, cálculos estatísticos, cálculos matemáticos e inclusive processos de *Machine Learning*. A biblioteca Pandas (Mckinney, 2010) é utilizada para importar conjunto de dados, bibliotecas como Matplotlib (Hunter, 2007) são utilizadas na geração de gráficos e bibliotecas como TensorFlow são utilizadas para *Machine learning*.

Assim, o objetivo desse trabalho foi desenvolver uma versão do 3PG na linguagem de programação Python versão 3.11.9 (Python Software Foundation, 2024) com o intuito de calibrar os parâmetros de crescimento de espécies florestais de forma automática e intuitiva, permitindo executar a simulação de crescimento de espécies com maior acurácia.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Desenvolvimento da ferramenta de calibração de parâmetros

O 3PG Tuning é um modelo computacional determinístico desenvolvido na linguagem de programação Python versão 3.11.9 (Python Software Foundation, 2024), utilizando as bibliotecas estatísticas Pandas (The pandas development team, 2023; McKinney, 2010), Numpy (Harris et al., 2020) e Matplotlib (Hunter, 2007). A ferramenta foi criada com base na sua versão original em Excel (<https://3pg.forestry.ubc.ca/software/>), mantendo o mesmo princípio de simulação do modelo 3PG (Physiological Principles Predicting Growth), mas adaptada para um ambiente de código aberto que permite maior flexibilidade na calibração, automação e integração com diferentes conjuntos de dados climáticos e fisiológicos. O script consiste na calibração de parâmetros baseada na aproximação ‘força bruta’ e testa todas as opções das combinações dos parâmetros selecionados para a calibração, também chamado de método exaustivo de otimização (Trakhtenbrot, 1984). O

funcionamento do modelo 3PG Tuning encontra os melhores parâmetros o crescimento de uma espécie arbórea.

A entrada de dados para a ferramenta é realizada por meio de um arquivo Excel que contém os parâmetros fisiológicos da espécie como eficiência fotossintética, coeficiente de extinção da radiação, área foliar específica, frações de alocação de biomassa, dados climáticos mensais de radiação solar, temperatura, precipitação e umidade e características do solo como capacidade de retenção de água e disponibilidade hídrica. Todos esses dados são importados em um DataFrame Python que executa o processamento dos dados. A ferramenta 3PG Tuning tem dois scripts principais:

1. Simulação do crescimento de biomassa das diferentes partes da planta, incluindo parte aérea, raízes, tronco e área basal (3PG – PREDICTION);
2. Calibração de parâmetros alométricos para o crescimento das espécies (3PG – TUNING).

2.2.2 3PG Prediction - simulação do crescimento de espécies

O 3PG Prediction faz a simulação do crescimento da espécie. Para isto, deve-se preencher a planilha Excel “data_3PG.xlsx” com os parâmetros de crescimento de fertilidade de solo (aba: “*parameters Data_Soil_Fertility*”) e com os parâmetros da espécie (aba “*parameters-Species*”)

Os dados climáticos incluem médias mensais de radiação solar, temperatura mínima, máxima e média, acumulado mensal da precipitação, quantidade de dias com chuva no mês, número de dias com geada no mês, se a área foi irrigada ou não, com preenchimento na aba “*climatical_data*”.

Os parâmetros de solo do 3PG, incluem a latitude da área de plantio, a fertilidade do solo, a classe textural (solo arenoso ou argiloso) e a capacidade de retenção de água. Além disso, são definidos parâmetros temporais, como a data de início do plantio e a data final prevista para a colheita, bem como o adensamento do plantio, que determina a densidade de árvores por hectare.

Os parâmetros da espécie (Tabela 1) pFS2 e pFS20 definem a proporção folhas/caule em árvores de diferentes diâmetros, pfsPower e pfsConst ajustam essa relação alométrica. Os parâmetros Tmin, Topt e Tmax caracterizam as temperaturas mínima, ótima e máxima para crescimento, enquanto kF indica perda de produção por dia de geada. A disponibilidade hídrica é calculada por SWconst e SWpower que regulam o efeito do déficit hídrico no solo. A fertilidade do solo é ajustada por m0, fN0 e fNn. Modificadores de idade como MaxAge, nAge e rAge descrevem como o crescimento varia ao longo dos anos. Taxas de senescência foliar são definidas por gammaFx, gammaF0 e tgammaF, e o turnover radicular por Rttover. As trocas gasosas são calculadas através dos parâmetros de condutância MaxCond, LAIgcx e BLcond. A densidade da madeira é dada por rhoMin, rhoMax e tRho, enquanto a eficiência na conversão de radiação é modelada por alpha (Landsberg e Waring, 1997).

Tabela 1 -Parâmetros do modelo 3PG, incluindo relações alométricas, modificadores ambientais, características do dossel, e propriedades da biomassa, empregados para a simulação dinâmica do crescimento e desenvolvimento floresta- (Sands ,2002).

Parameter Description	Name	Units	Values
Allometric relationships & partitioning			
Foliage:stem partitioning ratio @ D=2 cm	pFS2	-	0.052
Foliage:stem partitioning ratio @ D=20 cm	pFS20	-	0.3
Valores calculados de acordo com Sands and Landsberg (2002)	pfsPower		- 0.52287875
Valores calculados de acordo com Sands and Landsberg (2002)	pfsConst		0.431045823
Constant in the stem mass v. diam. relationship	StemConst	-	0.0557
Power in the stem mass v. diam. relationship	StemPower	-	2.7062
Maximum fraction of NPP to roots	pRx	-	0.5
Minimum fraction of NPP to roots	pRn	-	0.15
Temperature modifier (fT)			
Minimum temperature for growth	Tmin	deg. C	6
Optimum temperature for growth	Topt	deg. C	16
Maximum temperature for growth	Tmax	deg. C	40
Frost modifier (fFRost)			
Days production lost per frost day	kF	days	1
Soil water modifier (fSW)			
Moisture ratio deficit for fq = 0.5	SWconst0	-	0.7
Power of moisture ratio deficit	SWpower0	-	9

Fertility effects			
Value of 'm' when FR = 0	m0	-	0
Value of 'fNutr' when FR = 0	fN0	-	1
Power of (1-FR) in 'fNutr'	fNn	-	0
Age modifier (fAge)			
Maximum stand age used in age modifier	MaxAge	years	50
Power of relative age in function for fAge	nAge	-	4
Relative age to give fAge = 0.5	rAge	-	0.95
Litterfall & root turnover			
Maximum litterfall rate	gammaFx	1/month	0.013
Litterfall rate at t = 0	gammaF0	1/month	0.001
Age at which litterfall rate has median value	tgammaF	month	6
Average monthly root turnover rate	Rttover	1/month	0.01
Conductance			
Maximum canopy conductance	MaxCond	m/s	0.02
LAI for maximum canopy conductance	LAIgcx	-	3.33
Defines stomatal response to VPD	CoeffCond	1/mBar	0.05
Canopy boundary layer conductance	BLcond	m/s	0.2
Stem numbers			
Max. stem mass per tree @ 1000 trees/hectare	wSx1000	kg/tree	300
Power in self-thinning rule	thinPower	-	1.5
Fraction mean single-tree foliage biomass lost per dead tree	mF	-	0
Fraction mean single-tree root biomass lost per dead tree	mR	-	0.2
Fraction mean single-tree stem biomass lost per dead tree	mS	-	0.2
Canopy structure and processes			
Specific leaf area at age 0	SLA0	m ² /kg	11
Specific leaf area for mature leaves	SLA1	m ² /kg	4
Age at which specific leaf area = (SLA0+SLA1)/2	tSLA	years	2.5
Extinction coefficient for absorption of PAR by canopy	k	-	0.5
Age at canopy cover	fullCanAge	years	3
Maximum proportion of rainfall evaporated from canopy	MaxIntcptn	-	0.15
LAI for maximum rainfall interception	LAImaxIntcptn	-	0
Canopy quantum efficiency	alpha	molC/mol PAR	0.055
Ratio NPP/GPP	Y	-	0.47
Physical constants	poolFractn		0
	e20		2.2

	rhoAir		1.2
	Lambda		2460000
	VPDconv		0.000622
Branch and bark fraction (fracBB)			
Branch and bark fraction at age 0	fracBB0	-	0.75
Branch and bark fraction for mature stands	fracBB1	-	0.15
Age at which fracBB = (fracBB0+fracBB1)/2	tBB	years	2
Basic Density			
Minimum basic density - for young trees	rhoMin	t/m3	0.45
Maximum basic density - for older trees	rhoMax	t/m3	0.45
Age at which rho = (rhoMin+rhoMax)/2	tRho	years	4
Conversion factors			
Intercept of net v. solar radiation relationship	Qa	W/m2	-90
Slope of net v. solar radiation relationship	Qb	-	0.8
Molecular weight of dry matter	gDM_mol	gDM/mol	24
Conversion of solar radiation to PAR	molPAR_M J	mol/MJ	2.3

A partir dos parâmetros informados das espécies, parâmetros de solo e climáticos é possível realizar a simulação do crescimento da espécie desejada com o script “py3pg.ipynb” a partir da data de início e fim do crescimento. A análise dos fatores que influenciam o crescimento das espécies é feita utilizando uma série de modificadores que ajustam o crescimento potencial das árvores para refletir suas condições reais. Quanto mais próximo do valor 1 mais ele está próximo da condição ideal, sendo aplicado para temperatura, água no solo, nutrientes, entre outros. Isso implica que o crescimento das árvores não está sendo limitado por esse fator, sendo assim, o modelo calcula a produtividade como se estivesse em um cenário quase ideal. Por outro lado, quanto mais próximos os valores dos modificadores estiverem de 0, indicam que os fatores estão restringindo a capacidade máxima de crescimento, reduzindo o potencial de crescimento das árvores. Um dos modificadores utilizados pelo modelo é o modificador de temperatura (fT) que considera os limites térmicos mínimo, ótimo e máximo, sendo próximo de 1 quando a temperatura está na faixa ideal para o crescimento e reduzido em condições de frio ou calor extremos. De forma semelhante, o déficit de pressão de vapor (fVPD) regula o crescimento com base na umidade do ar; quando o fVPD é elevado, ocorre fechamento estomático para evitar perda excessiva de água, reduzindo fVPD. A disponibilidade hídrica no solo também

desempenha um papel crucial, representada pelo modificador J_{SW} , que diminui em condições de seca, restringindo a absorção de água pelas raízes e, consequentemente, o crescimento. Além das condições climáticas, a disponibilidade de nutrientes no solo, expressa pelo modificador J_{Nutr} , influencia diretamente a produtividade, sendo reduzida em situações de deficiência nutricional. Outros modificadores consideram o impacto das geadas (J_{Frost}), que pode comprometer o crescimento quando ocorrem eventos severos, e a idade das árvores (J_{Age}) que reflete a tendência de desaceleração do crescimento à medida que a planta amadurece. Por fim, o modificador fisiológico geral (Physmod) atua como um multiplicador ou fator de modulação que reduz a eficiência potencial da fotossíntese líquida, considerando restrições fisiológicas adicionais como estresse hídrico, limitações nutricionais e fatores ambientais que afetam a fisiologia sendo um indicativo do estado geral da planta. Juntos, esses modificadores permitem avaliar com maior precisão a resposta das árvores às variações ambientais, contribuindo para um melhor entendimento da dinâmica do crescimento florestal (Landsberg e Waring, 1997).

2.2.3 3PG Tuning

O objetivo do 3PG Tuning é a calibração dos parâmetros iniciais para o crescimento de uma espécie. Pode-se calibrar até 10 parâmetros conjuntamente por execução, no entanto, deve-se ser criterioso na quantidade de parâmetros escolhidos pois o tempo de processamento do 3PG Tuning é proporcional à quantidade de parâmetros selecionados. O 3PG Tuning irá executar todas as combinações possíveis entre os parâmetros que foram inseridos inicialmente pela aplicação do método de 'Força Bruta' (Trakhtenbrot, 1984). O cálculo para identificar essa quantidade de iterações pelo conjunto de parâmetros selecionados está descrita na equação 1.

$$Number\ of\ iterations = \prod_1^n \left(\frac{\max Val - \min Val}{step} + 1 \right) \quad (1)$$

sendo, max Val representa valor máximo do parâmetro, min Val representa valor mínimo do parâmetro, step define o intervalo pelo qual o parâmetro será ajustado em cada iteração e n o parâmetro a ser ajustado.

Por exemplo (Tabela 2), quando escolhemos 4 parâmetros a serem calibrados: “Minimum temperature for growth”, “Optimum temperature for growth”, “Maximum temperature for growth” e “Extinction coeficiente for absorption of PAR by canopy “. No arquivo em excel “data_3PG.xlsx” – aba “parameters-Species” deve-se adicionar o valor mínimo, máximo e o intervalo (passo) a ser aplicado.

Tabela 2 - Exemplos de parâmetros para o tuning, sendo: min Val = valor mínimo a ser testado,, max val =valor máximo a ser testado, Step = de quanto em quanto sera testado, Tmin = temperatura mínima , Topt= temperatura ótima, Tmax= temperatura máxima, k= coeficiente de extinção da luz

	min	max	
Param	Val	Val	Step
Tmin	4.0	8.0	0.5
Topt	10.0	20.0	0.5
Tmax	30.0	50.0	0.5
K	0.1	0.8	0.05

No exemplo de utilização temos para ‘Minimum Temperature for Growth’ temos 9 valores testados entre 4 °C e 8 °C com passo de 0.5 °C $((8-4)/0.5+1=9)$ e para ‘Optimal Temperature for Growth’, ‘Maximum Temperature for Growth’ e ‘Extinction coeficiente for absorption of PAR by canopy’, o número de valores a serem testados são 21, 41 e 15, respectivamente, totalizando 12915 iterações. Em cada iteração, o modelo utiliza R^2 ajustado para definir a precisão do modelo. A iteração com melhor desempenho retorna os 4 parâmetros finais ajustados.

2.2.4 Exemplo de utilização

A simulação do 3PG em Python foi realizada para o *Eucalyptus Globulus* Labill. utilizando parâmetros da espécie calibrados pelo módulo 3PG tuning. Os dados climáticos mensais de temperatura, radiação solar e de precipitação de Portugal

referentes à série histórica de 1981 à 2003. Foram incorporados à simulação, dados observados de crescimento para o eucalipto a partir do 6º até o 18º ano da Mata Nacional de Leiria na região centro-oeste de Portugal (Longitude 39.8007° (Oeste), Latitude 8.9674° (Sul), altitude 0 metros) que ocupa cerca de 11.000 hectares em solos arenosos e pobres em nutrientes, típicos do clima mediterrâneo marítimo com verões quentes e secos, com baixa precipitação, e invernos úmidos. Essa floresta é economicamente importante para a produção de madeira e pasta de celulose, além de desempenhar papel fundamental na proteção do solo e na biodiversidade local.

2.4 Resultados e discussão

A análise da eficiência do 3PG Tuning foi feita utilizando-se o coeficiente de determinação (R^2 ajustado) que é a métrica estatística utilizada para avaliar a qualidade do ajuste de um modelo de regressão múltipla. Essa métrica corrige a superestimação que pode ocorrer no modelo quando mais variáveis preditoras são adicionadas.

O R^2 ajustado para todas as iterações do 3PG tuning foi maior que 0.90, exceto para algumas iterações os parâmetros do 3PG tuning, do aplicativo, resultou em um coeficiente de determinação de 0.95 (Figura 1).

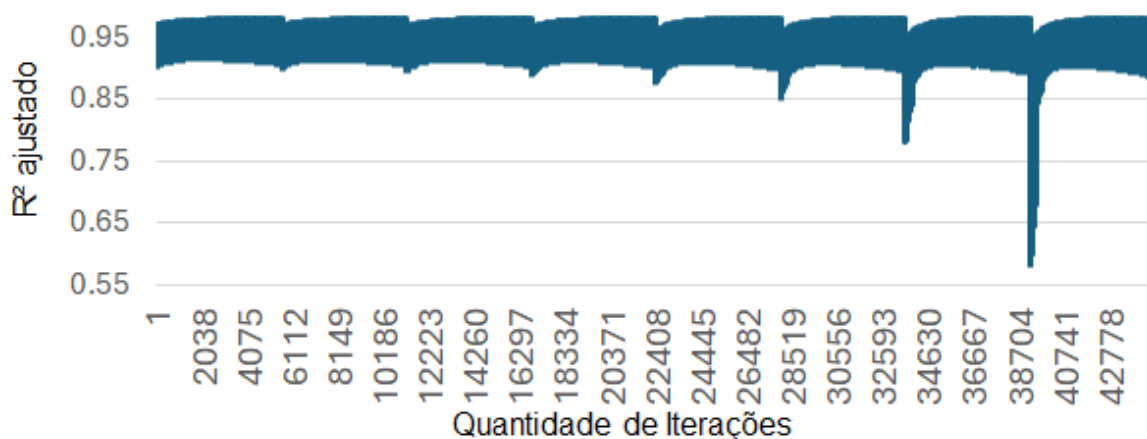


Figura 1 - Coeficiente de determinação ajustado (R^2) avaliado ao longo das iterações durante a calibração do modelo 3PG.

A calibração dos valores de T_{min} , T_{opt} , T_{max} e k foram iguais a 6 °C, 19.5°C, 30 °C e 0.5, respectivamente (Tabela 3), com coeficientes de determinação R^2 ajustados de 0,99, 0,98 e 0,96 para a biomassa da parte aérea, biomassa das folhas e biomassa da raiz, respectivamente.

Tabela 3 - Resultado obtido com os parâmetros de temperatura mínima (T_{min}), ótima (T_{opt}), máxima (T_{max}) e coeficiente de extinção da radiação (k) com o melhor valor de R^2 ajustado na calibração do modelo 3PG.

parâmetro	Valor mínimo	Valor Máximo	Passo	values tested	Optimized values
T_{min}	4	8	0.5	8	6
T_{opt}	10	20	0.5	20	19.5
T_{max}	30	50	0.5	40	30
k	0.1	0.8	0.1	7	0.5

Os resultados da simulação indicaram que a biomassa da parte aérea do eucalipto (figura 2.A) foi de aproximadamente 50 t ha⁻¹ no início da simulação, aumentando para 150 t ha⁻¹ aos 12 anos e atingindo 200 t ha⁻¹ aos 18 anos. Esses valores estão próximos dos observados resultando em um R^2 ajustado de 0.99.

O mesmo vale para a biomassa da madeira (Figura 2.B) que iniciou a simulação com 40 t ha⁻¹ atingindo aproximadamente 200 t ha⁻¹ para o eucalipto com 18 anos corroborando com os dados observados de Portugal.

Para a biomassa das folhas (Figura 2.C), o início da simulação correspondeu a aproximadamente 5.5 t ha⁻¹ atingindo 8.5 t ha⁻¹ para o eucalipto com 14 anos e diminuindo a biomassa para 7 t ha⁻¹ quando o eucalipto atinge 18 anos. De acordo com os dados observados de Portugal nota-se uma produção inicial de 5.5 t ha⁻¹, aumentando gradativamente até atingir 8.5 t ha⁻¹ para o eucalipto com 18 anos. O R^2 ajustado nesse caso foi de 0.798.

A biomassa das raízes do eucalipto (Figura 2.D) iniciou com aproximadamente 15 t ha⁻¹ aumentando para aproximadamente 30 t ha⁻¹ para o eucalipto aos 12 anos

atingindo 35 t ha^{-1} ao completar 18 anos. Nesse caso, o modelo subestimou o crescimento da biomassa da raiz a partir do 15º ano cujos dados observados chegaram a 40 t ha^{-1} e aproximadamente 50 t ha^{-1} para o eucalipto com 18 anos. O R^2 ajustado para essa comparação foi de 0.95.

A área basal (Figura 2.E) iniciou o crescimento com aproximadamente $10 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ e, no final do crescimento, chegou a $25 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ enquanto os valores observados foram de $27 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ e $30 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ para o eucalipto com 18 anos, respectivamente.

Nota-se que em geral o modelo ajustado privilegiou a biomassa acima do solo e a biomassa de madeira (importância econômica) em detrimento da biomassa de raízes e de folhas.

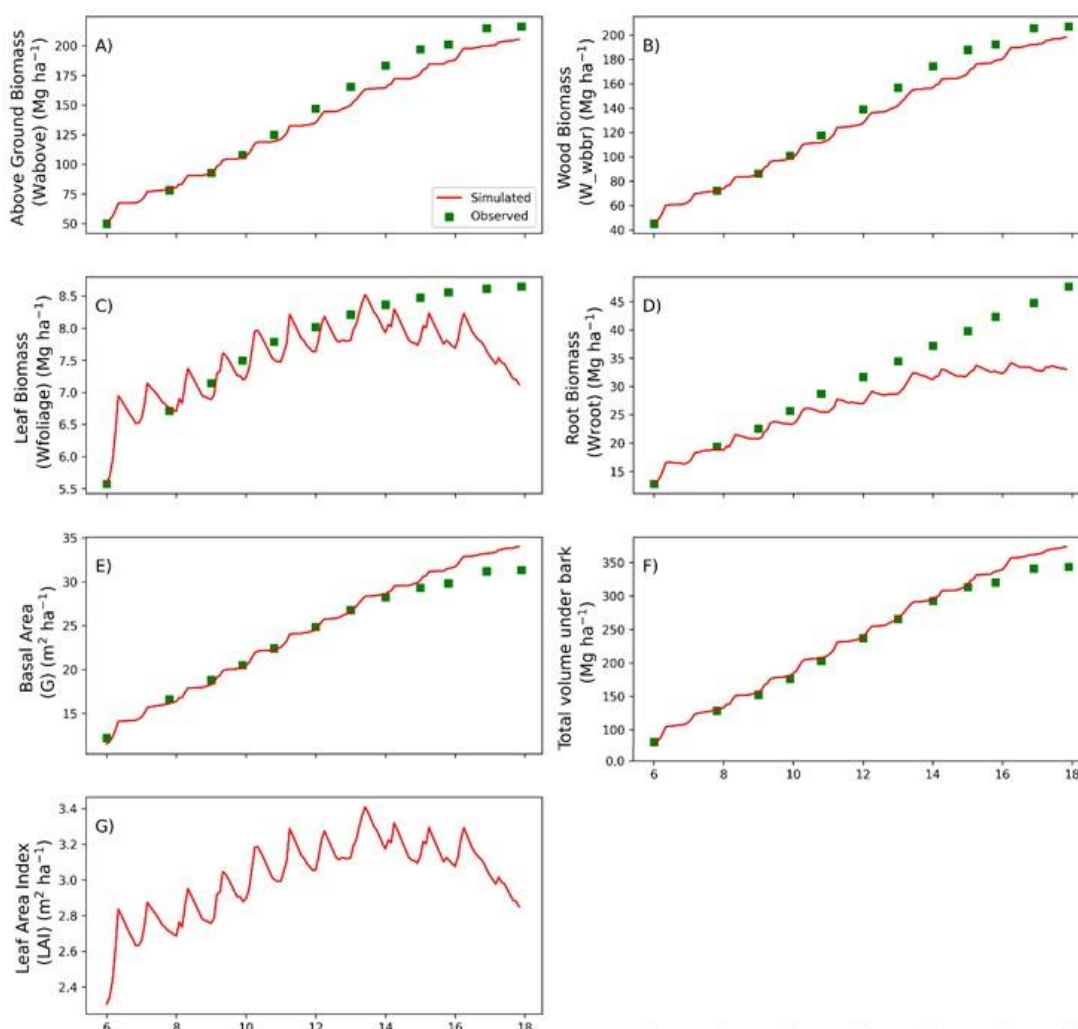


Figura 2 - Comparação entre os resultados simulados para o Eucalipto pelo modelo 3PG com dados observados para a floresta de Leiria de Portugal da biomassa acima

do solo, biomassa da madeira, biomassa das folhas, biomassa das raízes, área basal total, volume sob casca e índice de área foliar (LAI). Em verde os dados observados e em vermelho os valores simulados.

O índice Physmod é sensível a variabilidade climática sobre a produtividade do eucalipto, apresentando um valor próximo de zero durante todo o período de desenvolvimento da espécie (Figura 3) indicando, em ordem decrescente, que a disponibilidade hídrica (J_{SW}), a temperatura (J_T), o número de dias com geadas (J_{Frost}), foram os mais importantes.

O fator J_{SW} , que é um fator hídrico determinante ao longo de todos os anos, variando de 1 na estação chuvosa até valores próximos de zero na estação seca, estando fortemente correlacionado com Physmod. O verão na região de Leiria é caracterizado por temperaturas amenas e clima seco com uma precipitação média de 77mm. Essa variação do J_{SW} que chega a quase 0mm em julho e agosto, que são os meses de verão no hemisfério norte (Figura 5). Caso houvesse irrigação, a J_{SW} provavelmente permaneceria constante, próximo de 1. A oscilação observada em J_{SW} indica que esse talhão não foi irrigado, reforçando o impacto da disponibilidade hídrica no crescimento do cultivo.

Houve também uma variação em relação ao crescimento devido à Temperatura (J_T), fortemente influenciada pelas estações do ano, como inverno e verão. Houve também alguns picos de J_{Frost} nos anos 8, 9, 10, 14, 17 e 18, que atingiram valores próximos de 0,5, podem ter limitado o crescimento nesses períodos.

A disponibilidade hídrica e a temperatura foram fatores limitantes, alternando entre condições favoráveis e limitantes. Na região de Leiria em Portugal, a disponibilidade hídrica no verão é restrita, visto que a precipitação é baixa e o clima fica bastante seco principalmente entre julho e agosto. As Figuras 3 e 4 indicam essa baixa disponibilidade hídrica em todos os anos através do modificador J_{SW} . O parâmetro J_{Nutri} permaneceu constante em 1, indicando que o cultivo não sofreu restrições nutricionais, sugerindo que o solo é fértil ou havia adubação adequada.

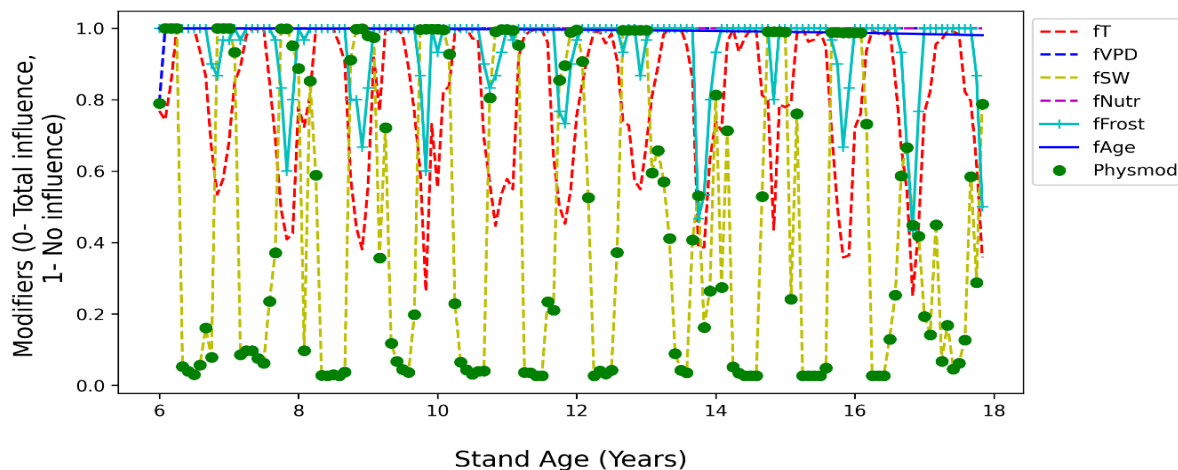


Figura 3. Modificadores de efeitos da temperatura, evapotranspiração, precipitação, nutrição, dias com geada e idade da planta, onde valores próximos a 1 indicam ausência de influência negativa e valores próximos a 0 indicam forte limitação no crescimento do eucalipto para no período entre 6 e 18 anos da planta.

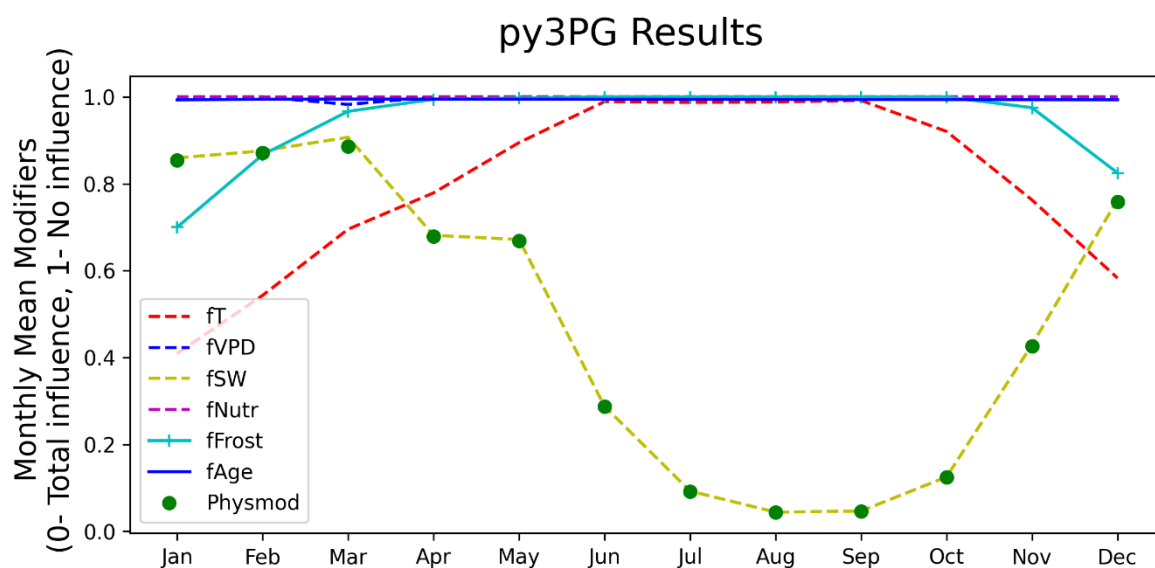


Figura 4. Modificadores de efeitos da temperatura, evapotranspiração, precipitação, nutrição, dias com geada e idade da planta ao longo de 1 ano médio.

2.5 Conclusão

O 3PG-tuning é uma versão de código aberto em Python da versão original do 3PG em Excel com o enfoque de calibração de parâmetros fisiológicos para espécies arbóreas de forma automatizada. Os resultados da calibração de parâmetros para o *Eucalyptus Globulus* Labill. indicaram que o modelo foi calibrado com sucesso para

estimativas de biomassa da parte aérea e de madeira. Podem ser realizados ajustes em parâmetros do modelo que afetam diretamente a produção de folha e de raízes, considerando a subestimativa a partir do 14º ano.

Software availability

Name of software: 3-PG Tuning

Developers: Glauco de Souza Rolim, Maria Teresa Vieira Nogueira Abdo, Denise Kubilius Suyama, Margarida Tomé

Contact address: Departament of Mathematical Sciences Unesp Jaboticabal. São Paulo State University "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/n. CEP: 14.884-900 - Bairro Rural - Jaboticabal/SP/Brazil.

Referências

Elli EF, Sentelhas PC, Bender FD (2020) Impacts and uncertainties of climate change projections on *Eucalyptus* plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management** 474. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118365>

Elli EF, Sentelhas PC, de Freitas CH, Carneiro RL, Alvares CA (2019) Assessing the growth gaps of *Eucalyptus* plantations in Brazil – Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management** 451. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117464>

Florêncio GWL, Martins FB, Fagundes FFA (2022) Climate change on *Eucalyptus* plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. **Industrial Crops and Products** 188. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538>

Gupta R, Sharma LK (2019) The process-based forest growth model 3-PG for use in forest management: A review. **Ecological Modelling** 397:55–73. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.01.007>

Hakamada R, Coronado JP, Falcão CJLM, Carrero O, Sulbarán-Rangel B (2025) 3PG model to estimate the productivity, carbon storage and aridity index of *Eucalyptus* L'Hér. forest plantations in Mexico. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** 16(87):127–152. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i87.1474>

Hunter JD (2007) Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science and Engineering* 9(3):90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>

Karki R, Qi J, Gonzalez-Benecke CA, Zhang X, Martin TA, Arnold JG (2023) SWAT-3PG: Improving forest growth simulation with a process-based forest model in SWAT. *Environmental Modelling and Software* 164. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105705>

Karki R, Qi J, Zhang X, Srivastava P (2025) Evaluating SWAT-3PG simulation of hydrologic and water quality processes in a forested watershed: a case study in the St. Croix River Basin. *Journal of Hydrology* 648. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132393>

Landsberg JJ, Waring RH (1997) A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* 95.

Lemos CZ, Carrero O, Hakamada R, Silva LF, Ferreira K, Stape JL (2023) 3-PG model enhancement by modifying soil water availability in a tropical *Eucalyptus urophylla* plantation. *Scientia Forestalis* 51. <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.07>

McKinney W (2010) Data structures for statistical computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference* (SciPy).

Palma JHN, Hakamada R, Moreira GG, Nobre S, Rodriguez LCE (2021) Using 3PG to assess climate change impacts on management plan optimization of *Eucalyptus* plantations: a case study in Southern Brazil. *Scientific Reports* 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81907-z>

Sabino W, Costa L, Andrade T, Teixeira J, Araújo G, Acosta AL, Carvalheiro L, Giannini TC (2022) Status and trends of pollination services in Amazon agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 335. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108012>

Sands P (2004) Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data collection and parameter assignment. *CRC for Sustainable Production Forestry*.

Sands PJ, Landsberg JJ (n.d.) Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*.

Silva GCC, Neves JCL, Marcatti GE, Soares CPB, Calegario N, Júnior CAA, Gonzáles DGE, Gleriani JM, Binoti DHB, Paiva HN, Leite HG (2023) Improving 3-PG calibration and parameterization using artificial neural networks. *Ecological Modelling* 479. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110301>

Sondermann M, Chou SC, Lyra A, Latinovic D, Siqueira GC, Junior WC, Giornes E, Leite FP (2022) Climate change projections and impacts on the *Eucalyptus* plantation around the Doce River basin, Minas Gerais, Brazil. *Climate Services* 28. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100327>

CAPÍTULO 3 – Produtividade Potencial de Carbono da Seringueira (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) para a América do Sul utilizando o modelo 3PG

Resumo - O sequestro de carbono na seringueira ocorre pela absorção de CO₂ atmosférico durante a fotossíntese, com armazenamento na biomassa (tronco, folhas e raízes). Esse processo contribui para mitigar as mudanças climáticas e pode agregar valor à produção de látex, considerando o carbono sequestrado. A quantificação da biomassa e do carbono fixado na madeira e no látex é essencial para viabilizar pagamentos por serviços ambientais desde os primeiros anos de cultivo, visto que a sangria inicia apenas após cerca de sete anos. Para estimar o crescimento e a produtividade da seringueira, aplicou-se o modelo ecofisiológico 3PG (*Physiological Principles Predicting Growth*), implementado em Python e adaptado para a América do Sul. O modelo utiliza parâmetros fisiológicos, genéticos, de manejo e dados climáticos (irradiância, temperatura e precipitação) obtidos da plataforma NASA-Power (1990–2023) em 7000 pontos. Os resultados indicaram maior produtividade potencial (PP) entre 380 e 400 t ha⁻¹, sob irradiância de 15–16 MJ m⁻² dia⁻¹, temperatura média de 25–26 °C e precipitação de 2500–3000 mm anuais, abrangendo Norte, Sul e Sudeste do Brasil e Sul da Colômbia. O segundo maior PP (350–420 t ha⁻¹) ocorreu com irradiância de 15–18 MJ m⁻² dia⁻¹, 15–20 °C e 1800–2000 mm, em parte do Sudeste, Sul do Brasil e norte da Argentina. Nas regiões andinas, com irradiância >20 MJ m⁻² dia⁻¹, T de 8–10 °C e P <500 mm, a PP foi próxima de zero.

Palavras-chave: Sequestro de carbono, Produtividade potencial, 3PG, Python, Modelagem ecofisiológica.

CHAPTER 3 - Potential Carbon Productivity of Rubber Tree (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) in South America Using the 3PG Model

Abstract - Carbon sequestration in rubber trees occurs through the absorption of atmospheric CO₂ during photosynthesis, with storage in biomass (trunk, leaves, and roots). This process contributes to mitigating climate change and can add value to latex production by considering the carbon sequestered by the crop. Quantifying biomass and carbon fixed in wood and latex is essential to enable payment for environmental services in the early years of cultivation, since tapping begins only after about seven years. To estimate the growth and productivity of *Hevea brasiliensis* Müll. Arg., the eco-physiological 3PG model (Physiological Principles Predicting Growth) was implemented in Python and adapted for South America. The model uses physiological, genetic, management, and climatic data (irradiance, temperature, and precipitation) obtained from the NASA-Power platform (1990–2023) at 7,000 sites. Results indicated the highest potential productivity (PP) between 380 and 400 t ha⁻¹ under irradiance of 15–16 MJ m⁻² dia⁻¹, mean temperature of 25–26 °C, and annual rainfall of 2,500–3,000 mm, covering northern, southern, and southeastern Brazil and southern Colombia. The second highest PP (350–420 t ha⁻¹) occurred under irradiance of 15–18 MJ m⁻² dia⁻¹, temperature of 15–20 °C, and precipitation of 1,800–2,000 mm, in parts of southeastern and southern Brazil and northern Argentina. In Andean regions, with irradiance >20 MJ m⁻² dia⁻¹, temperature 8–10 °C, and rainfall <500 mm, PP was close to zero.

Keywords: Carbon sequestration, Potential productivity, 3PG, Python, Ecophysiological modeling

3.1 Introdução

A seringueira (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg) é uma árvore nativa da bacia Amazônica no Brasil (Singh et al., 2021), Venezuela, Colômbia, Peru e Bolívia (Pasha; Dadhwal, 2024) cultivada principalmente pela produção do látex que, por possuir características específicas de elasticidade, resistência e dissipação de calor (Navarro et al., 2024), se tornou uma “commodity” global valiosa (Singh et al., 2021) por representar até 90% da borracha natural vendida nos mercados internacionais (Kositsup et al., 2009) e é utilizado em diversos produtos como luvas descartáveis, material cirúrgico, pisos e revestimentos e, principalmente, pneus (Nogueira et al., 2015).

Embora a seringueira seja nativa do Brasil, atualmente a Ásia é a maior produtora de borracha, respondendo por 89% da produção mundial, com 60% dessa produção concentrada na Tailândia e na Indonésia (Singh et al., 2021). No Brasil, a produção a produção de látex enfrenta desafios significativos, incluindo a baixa rentabilidade (Jaramillo-Giraldo et al., 2017), o que impede o país de ser autossuficiente. O déficit de oferta de borracha natural torna o mercado ainda menos rentável, tornando-o vulnerável às flutuações dos preços internacionais (Nogueira et al., 2015). Esse cenário é agravado pela falta de subsídios governamentais, opções limitadas de crédito e pelo fato do cultivo da seringueira iniciar sua produção apenas a partir do 7º ano de plantio, deixando os produtores sem renda durante esse período (Árvore; Viçosa, 2013). Essa baixa rentabilidade também é sentida no Peru onde já houve decréscimo de extração do látex (Fitts et al., 2020). Diante dessa situação, existe a necessidade de melhorar essa rentabilidade de forma que os produtores possam se beneficiar e serem incentivados a produzir o látex se apropriando de um cultivo mais sustentável, com um aumento expressivo da área e a plantarem mais florestas para que exista um aumento expressivo da área destinada à seringueira visando a autossuficiência em látex no Brasil.

No Brasil, uma política de proteção com uma alta porcentagem na alíquota de importação poderia favorecer os produtores locais, mas, ações nesse sentido ainda não fazem parte de uma política pública consistente para o cultivo da seringueira. Outra forma de incentivo seria a implantação de pagamentos por serviços ambientais que favorecessem produtores que adotam manejos sustentáveis assim como a

valoração do carbono sequestrado pelo cultivo ao longo de seu ciclo, sendo essas remunerações complementares à remuneração pelo látex comercializado.

O sequestro de carbono é uma estratégia para combater as mudanças climáticas e sua compensação pode ser utilizada em projetos REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation*) (Andrade et al., 2022) principalmente porque esse sequestro ajuda na atenuação da emissão de gases de efeito estufa (Nattharom et al., 2021). Atualmente, não existe um mercado que atenda a comercialização do sequestro de carbono e agregação de valor por essa fixação sendo que isso é de extrema importância para as agências governamentais (Nattharom et al., 2021; Tito et al., 2022).

Há poucos estudos relacionados ao sequestro de carbono na seringueira e outros cultivos pois esse sequestro muda ao longo do ciclo de vida do cultivo e não é muito fácil seu cálculo em larga escala (Pasha; Dadhwal, 2024). Alguns estudos mostram que a seringueira tem maior potencial na fixação de carbono em relação a outros cultivos como por exemplo, o eucalipto (Navarro et al., 2024), o cacau e a laranja (Andrade et al., 2022) e iniciativas de plantio em novas áreas com esse cultivo podem ser estimuladas.

O presente trabalho visou estimar a produtividade potencial e atingível da biomassa, látex e sequestro de carbono de seringueira usando o modelo 3PG para a América do Sul para mensurar e valorar essas variáveis como forma de auxiliar na implantação de políticas públicas não só no Brasil, mas na América do Sul, melhorando a renda dos produtores de látex.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Obtenção e processamento de dados climáticos

Os dados meteorológicos diários de irradiância solar (Q_g), temperatura mínima (T_{min}) e máxima do ar (T_{max}) e precipitação (P) foram extraídos da base da NASA Power (*National Aeronautics and Space Administration/Prediction of Worldwide Energy Resources* - <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>) no período de 1990 à 2023 utilizando a API em Python da Nasa (<https://www.noaa.gov>). A malha de

pontos foi definida através do sistema de informações geográficas QGIS (QGIS Development Team, 2021). Foram gerados 7.000 pontos com espaçamento de 55 km abrangendo a América do Sul entre as latitudes e longitudes 54°47'44.4"S, 65°22'14.6"W e 12°12'48.2"N, 71°32'52.6"W (Figura 5).

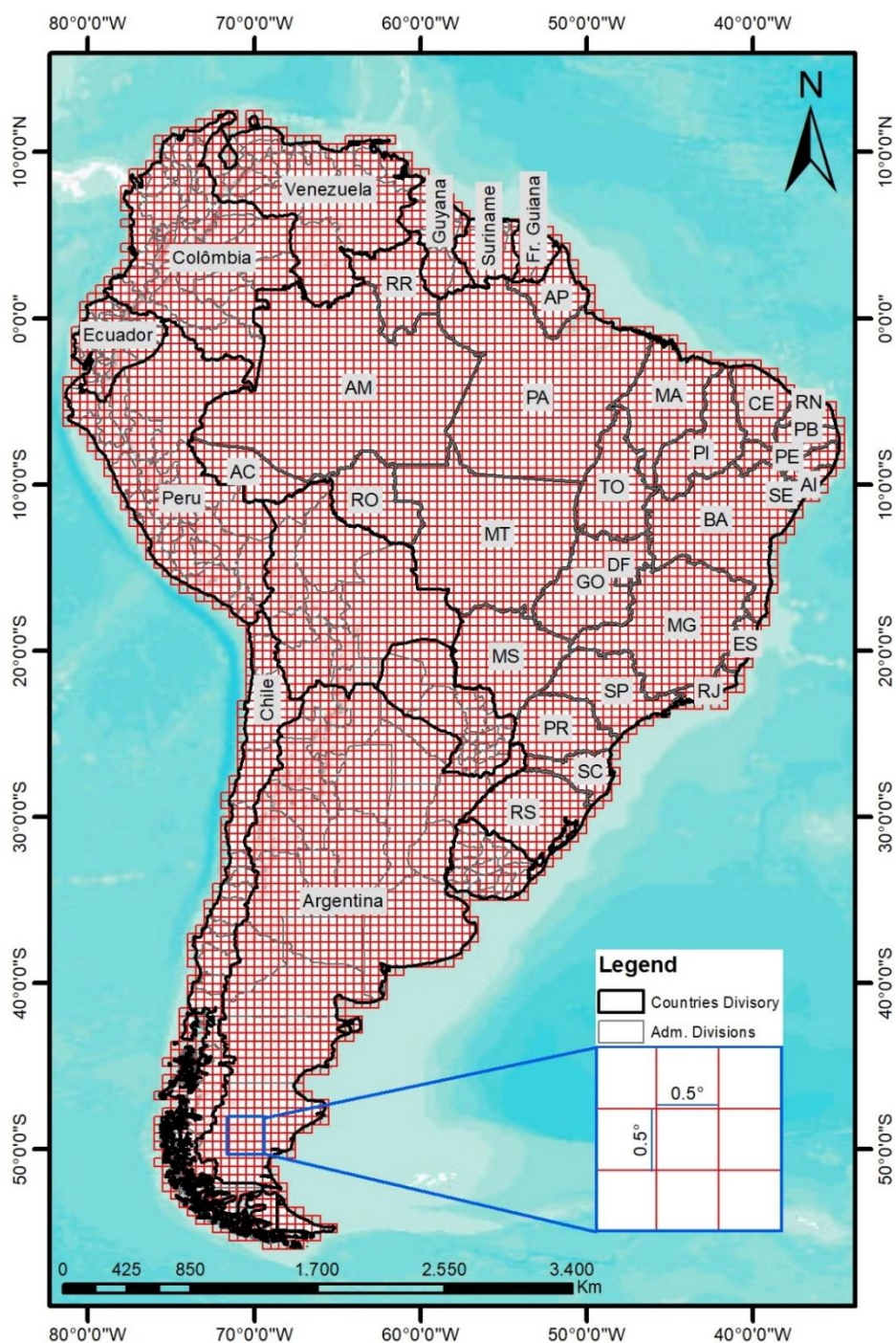


Figura 5. Mapa dos 7000 pontos com raio de 55 km extraídos do sistema NASA Power.

Com os dados meteorológicos diários, foram calculadas as médias mensais de temperatura do ar e irradiância solar e a soma da precipitação mensal para cada ano de 1990 à 2023 por ponto. Estes cálculos foram feitos utilizando a linguagem Python versão 3.11.9 (Python Software Foundation, 2024) e suas bibliotecas estatísticas Pandas (McKinney, (2010), Numpy (HARRIS et al., 2020) e Matplotlib (Hunter, 2007).

3.2.2 Modelo 3PG

O 3PG é um modelo determinístico que simula os processos fisiológicos das plantas amplamente utilizado para modelagem de espécies florestais. Ele utiliza equações que relacionam fatores climáticos, eficiência fisiológica da planta na utilização da irradiância solar, calculando a taxa de fotossíntese, transpiração, de biomassa nas diversas partes das árvores. (GUPTA; SHARMA, 2019; LANDSBERG; WARING, 1997) (Figura 6).

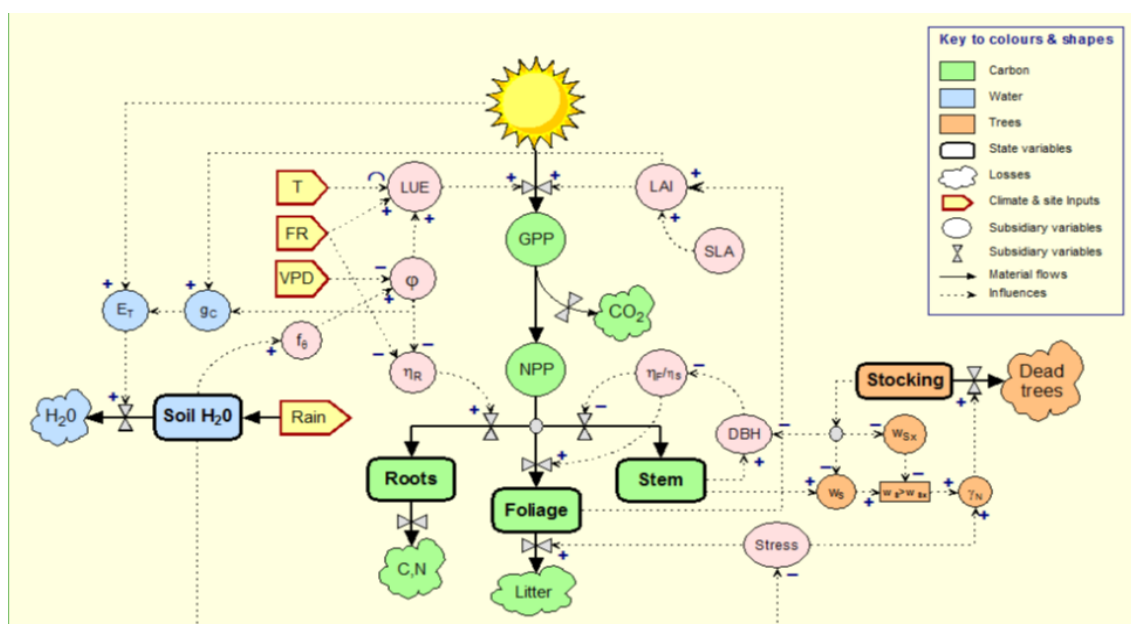


Figura 6 - Fluxograma do Physiological Principles Predicting Growth - 3 PG (Landberg e Waring, 1997).

3.2.3 Cálculo da biomassa

Através da interceptação da irradiância, as equações do modelo 3PG (utilizando a lei de Beer) fazem a conversão da irradiância fotossinteticamente absorvida (APAR) em produtividade primária líquida que é distribuída entre raízes, folhas e troncos (Gupta e Sharma, 2019; Landsberg e Waring, 1997).

Utilizando os conceitos do modelo 3PG foi criado um modelo computacional em Python versão 3.11.9 (Python Software Foundation, 2024) para calcular o crescimento da biomassa da seringueira. Os parâmetros utilizados para o crescimento, foram extraídos de pesquisas realizadas na China e Brasil (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros utilizados nas simulações do modelo 3PG.

Meaning	Name	Units	Hevea Brasiliensis	Reference
Allometric relationships & partitioning				
Foliage:stem partitioning ratio @ D=2 cm	pFS2	-	0.055	
Foliage:stem partitioning ratio @ D=20 cm	pFS20	-	0.3	
	pfsPower	-	-0.52	
	pfsConst	-	0.43	
Constant in the stem mass v. diam. relationship	SternConst	-	0.0557	
Power in the stem mass v. diam. relationship	SternPower	-	2.7062	
Maximum fraction of NPP to roots	pRx	-	0.5	Yang et al. 2017
Minimum fraction of NPP to roots	pRn	-	0.15	Yang et al. 2017
Temperature modifier (fT)				
Minimum temperature for growth	Tmin	deg. C	6	tunning
Optimum temperature for growth	Topt	deg. C	19.5	tunning
Maximum temperature for growth	Tmax	deg. C	30	tunning
Frost modifier (fFRost)				
Days production lost per frost day	kF	days	1	
Soil water modifier (fSW)				
Moisture ratio deficit for $f_s = 0.5$	SWconst0	-	0.7	FAO, 1998
Power of moisture ratio deficit	SWpower0	-	9	
Fertility effects				
Value of 'm' when FR = 0	m0	-	0	
Value of 'fNutr' when FR = 0	fN0	-	1	
Power of (1-FR) in 'fNutr'	fNn	-	0	
Age modifier (fAge)				
Maximum stand age used in age modifier	MaxAge	years	50	https://www.iac.sp.gov
Power of relative age in function for fAge	nAge	-	4	
Relative age to give fAge = 0.5	rAge	-	0.95	
Litterfall & root turnover				
Maximum litterfall rate	gammaFx	1/month	0.013	Martius et al. 2004
Litterfall rate at t = 0	gammaF0	1/month	0.001	
Age at which litterfall rate has median value	tgammaF	month	6	Martius et al. 2004
Average monthly root turnover rate	Rtturn	1/month	0.01	
Conductance				
Maximum canopy conductance	MaxCond	m/s	0.02	rodrigo et al 2005
LAI for maximum canopy conductance	LAIgcx	-	3.33	
Defines stomatal response to VPD	CoeffCond	1/mBar	Tunning	
Canopy boundary layer conductance	BLcond	m/s	0.2	
Stem numbers				
Max. stem mass per tree @ 1000 trees/hectare	wSx1000	kg/tree	300	
Power in self-thinning rule	thinPower	-	1.5	
Fraction mean single-tree foliage biomass lost per dead tr mF	-	-	0	
Fraction mean single-tree root biomass lost per dead tree mR	-	-	0.2	
Fraction mean single-tree stem biomass lost per dead tree mS	-	-	0.2	
Canopy structure and processes				
Specific leaf area at age 0	SLA0	m ² /kg	11	
Specific leaf area for mature leaves	SLA1	m ² /kg	4	
Age at which specific leaf area = (SLA0+SLA1)/2	tSLA	years	2.5	
Extinction coefficient for absorption of PAR by canopy	k	-	0.5	rodrigo, 2007
Age at FULL canopy cover	fullCanAge	years	3	
Maximum proportion of rainfall evaporated from canopy	MaxIntcptn	-	0.15	
LAI for maximum rainfall interception	LAImaxIntcptn	-	0	
Canopy quantum efficiency	alpha	molC/molPAI	0.055	
Ratio NPP/GPP	Y	-	0.47	
Constantes	poolFractn	-	0	
	e20	-	2.2	
	rhoAir	-	1.2	
	lambda	-	2460000	
	VPDconv	-	0.000622	
Branch and bark fraction (fracBB)				
Branch and bark fraction at age 0	fracBB0	-	0.75	
Branch and bark fraction for mature stands	fracBB1	-	0.15	
Age at which fracBB = (fracBB0+fracBB1)/2	tBB	years	2	
Basic Density				
Minimum basic density - for young trees	rhoMin	t/m3	0.45	
Maximum basic density - for older trees	rhoMax	t/m3	0.45	
Age at which rho = (rhoMin+rhoMax)/2	tRho	years	4	
Conversion factors				
Intercept of net v. solar radiation relationship	Qa	W/m2	-90	
Slope of net v. solar radiation relationship	Qb	-	0.8	
Molecular weight of dry matter	gDM_mol	gDM/mol	24	
Conversion of solar radiation to PAR	molPAR_MJ	mol/MJ	2.3	

Foram feitas avaliações iniciais com os parâmetros calibrados para os locais:
Alta Floresta, Altamira, Campinas, Couripe, Curitiba, Guaxupé, Palestina, São José

do Rio Preto, Toledo no Brasil, Bogotá na Colômbia, Canaima na Venezuela, Santa Rosa na Argentina e La Paz na Bolívia. Esses locais foram escolhidos por conter regiões climatologicamente diversas para validar o 3PG-tuning. Todas essas avaliações foram realizadas calculando os valores médios anuais para Q_g , T_{min} , T_{max} e P da base extraída da NASA.

Tais avaliações foram feitas executando o modelo 3PG para cada local analisando a produtividade potencial e atingível em comparação com dados de literatura. Na Colômbia, por exemplo, comparou-se os resultados de produtividade com encontrados por Andrade et al., 2022 para temperatura entre 16° C e 27.5° C. Para as localidades de São José do Rio Preto e Campinas foram encontrados valores de produtividade atingível similares à dados de pesquisa no Sri Lanka onde a temperatura média era de 28° C (Rukkhun et al., 2020).

3.2.4 Estimativa da produção do Látex e carbono fixado na parte aérea

O cálculo do fluxo de látex leva em consideração vários fatores, incluindo a disponibilidade de recursos para o crescimento do tronco e a alocação desses recursos para a produção do látex (Lacote et al., 2004). Este cálculo foi realizado utilizando o potencial de crescimento do tronco multiplicado pela biomassa do caule como proposto por Yang et al. (2019) (equação 2).

$$Latex_{pot} = DW_{st} \times StemFractionFactor \quad (2)$$

sendo, DW_{st} a biomassa do caule estimada pelo 3PG e $StemFractionFactor$ que é a porcentagem do crescimento do caule que é alocada para a produção do látex (YANG et al., 2019).

A quantidade de carbono foi estimada multiplicando o incremento anual na biomassa estimada pelo 3PG pelo fator de conversão de carbono igual a 0.47 para árvores na zona tropical conforme proposto por NATTHAROM et al. (2021).

3.2.5 Determinação de regiões climatologicamente semelhantes na América do Sul

Foi utilizado o modelo de classificação K-Means (AUTOR, DATA) que divide o conjunto de dados em um número predeterminado de subconjuntos análogos e heterogêneos (clusters). Cada conjunto de dados do cluster é agrupado pela distância do centro do mesmo (centróide), chamada de distância Euclidiana. O primeiro centróide é escolhido aleatoriamente e os demais são escolhidos por uma maior distância do primeiro até chegar no último cluster. É um modelo bastante utilizado em análise exploratória de dados (Dooyum Uyeh et al., 2022) por ser simples, eficiente e ter boa acurácia (Preedasawakul; Wiroonsri, 2025).

3.3 Resultados e discussão

O Kmeans classificou as diversas áreas da América do Sul em clusters caracterizando, por exemplo variando entre 15,9 MJ m⁻² dia⁻¹ e 17,3 MJ m⁻² dia⁻¹, temperatura entre 22,7 °C e 25,9 °C e precipitação acima de 26.669 mm como cluster 1 que corresponde a uma parte da região Amazônica (Figura 7). A classificação do cluster 6 que compreende o noroeste do estado de São Paulo, sudoeste de Minas Gerais, Goiás e Tocantins ficou climatologicamente semelhante a uma parte da Venezuela e Colômbia com temperaturas entre 20,7°C e 29,4°C, precipitação entre 1691,4 mm e 2127 mm que favorecem alguns cultivos como a Seringueira.

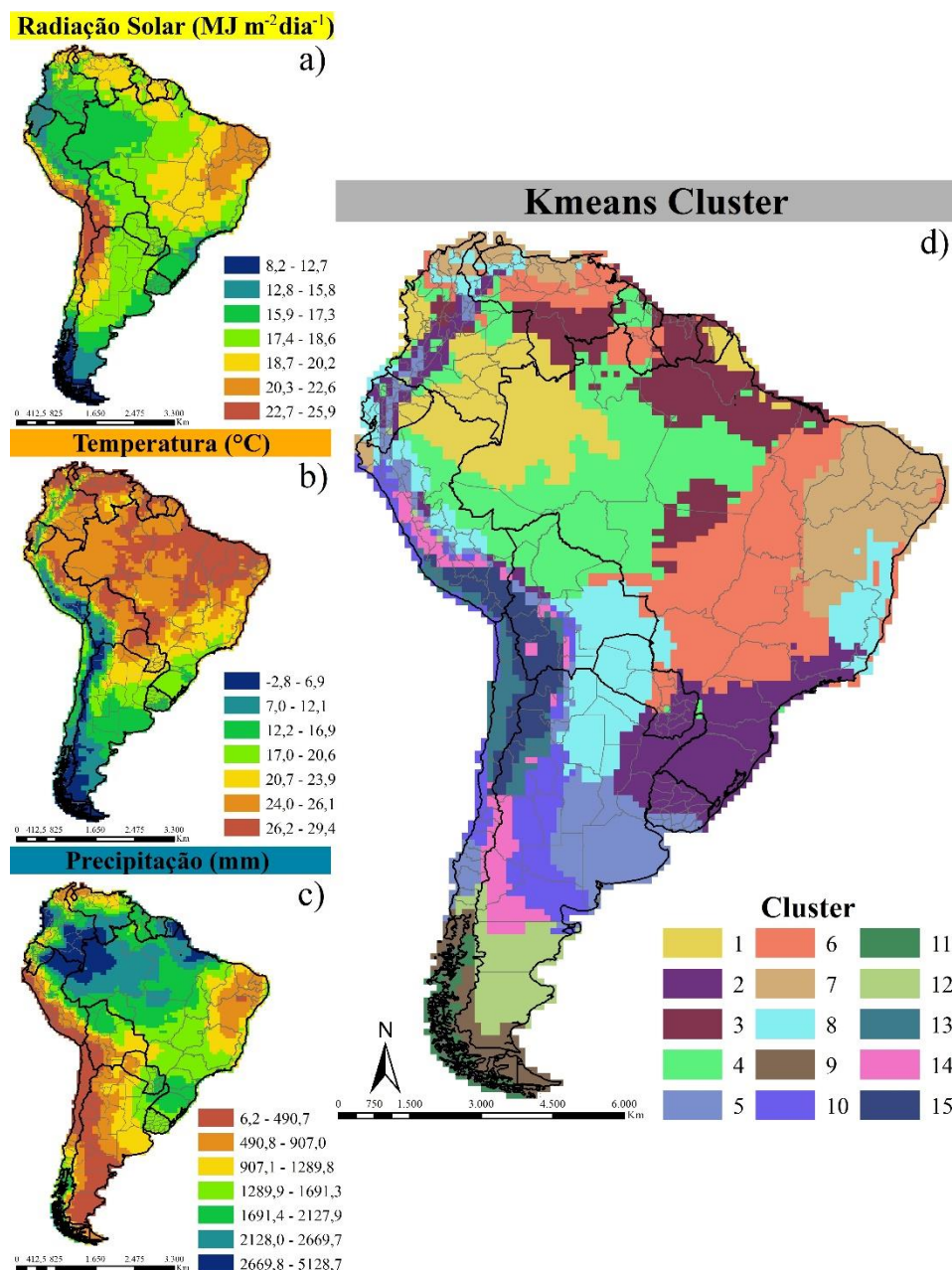


Figura 7 - Agrupamento climático para a América do Sul feito através do K-MEANS.

A estimativa da biomassa atingível nas regiões sul e sudeste do Brasil, bem como parte do centro-oeste e algumas regiões da Colômbia e Venezuela foi estimada pelo 3PG e está apresentada na figura (Figura 8). Os resultados variaram entre 109,3 t ha^{-1} a 218,3 t ha^{-1} para a região que compreende o Norte da Argentina, Sul do Brasil e uma parte do Sudeste do Brasil, que desponta com uma grande promessa para o avanço do cultivo. Nesses locais as temperaturas variam entre 17 $^{\circ}\text{C}$ e 26 $^{\circ}\text{C}$ e P entre 1289 e 2127 mm anuais corroborando com Andrade et al. (2022), que obtiveram

biomassa atingível de 150 t ha⁻¹ para a temperatura anual média de 26 °C na Colômbia. Resultados obtidos por Yang et al. (2019) também apresentaram produtividade atingível semelhantes com média de 121 t ha⁻¹, para a temperatura variando entre 18 °C e 22 °C, através “*crop model*” LUCIA. Comparando figura 8A (produtividade potencial) e figura 8B (produtividade atingível) o cultivo tem grande potencial para o sul de minas, São Paulo e Mato grosso seguido em menor escala pelo Paraná e norte da Argentina. No mapa 8B notamos que o fato disponibilidade hídrica pode limitar a expansão do cultivo no nordeste brasileiro, norte da Argentina e Amazônia.

Associando os as duas variáveis: Qg e P podemos afirmar que o cultivo encontra nas regiões do sudeste do Brasil, nordeste da Argentina e Uruguai as áreas de maior potencial para expansão do cultivo. Essa condição pode ser modificada pela implantação de áreas irrigadas, o que permitiria uma maior produtividade em áreas mais extensas e com isso figura 8A incluiríamos a expansão do cultivo para o MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). Isso pode ser justificado pela alta tecnologia no cultivo quando associada com outras espécies por exemplo cacau, macaúba, frutíferas e outras.

Há um potencial produtivo também em Minas Gerais, Goiás e Tocantins devido à suas condições climáticas de temperatura e precipitação já citadas. Pode-se perceber isto também na figura 8C.

No presente trabalho foram encontrados valores praticamente nulos de produtividade potencial para a região do deserto do Atacama. Isso porque, o Deserto do Atacama é um dos desertos mais áridos da Terra e suas condições climáticas extremas comprometem os recursos de alocação para a fotossíntese das plantas diminuindo seu crescimento (Gajardo et al., 2024). O Atacama tem alto nível de irradiância solar (600 W m⁻²), grande variação de temperatura no dia (mínimas de -5 °C e máximas de 36 °C) e baixa precipitação (50 mm anual) (Gajardo et al., 2024). As condições extremas ocasionam estresse nos cultivos diminuindo de forma drástica sua produtividade (Zandalinas; Mittler, 2022). Os estresses abióticos inibem a fotossíntese, o crescimento das plantas e, no caso da seringueira, também a produção de látex (Santos et al., 2023). Isso ocorre porque a fotossíntese é o processo pelo qual

as plantas convertem luz solar em energia química na forma de ATP e NADPH, além de fixarem o CO_2 durante a carboxilação, o que é essencial para o crescimento dos cultivos (Sterling et al., 2019).

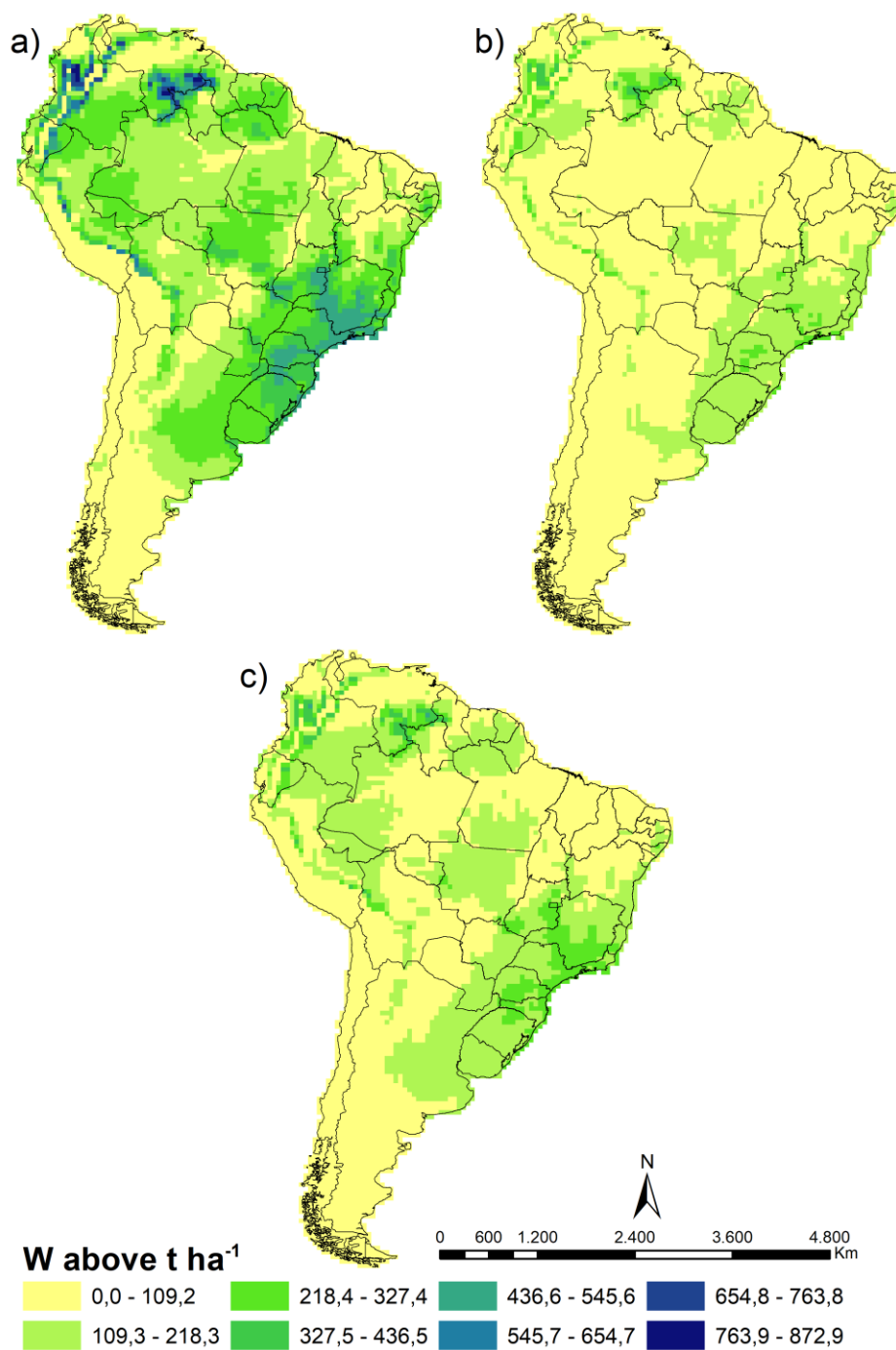


Figura 8. A) Produtividade potencial (PP), B) produtividade atingível (PA) e C) Diferença entre a produtividade potencial e atingível (PP-PA).

Para o sequestro de carbono, valores entre 109,3 t ha⁻¹ e 218,3 t ha⁻¹ foram estimados nas regiões do norte da Argentina, sul, sudeste, centro-oeste, norte do Brasil, uma parte da Amazônia e Venezuela, Colômbia (Figura 9). Resultados semelhantes foram estimados no sul da Tailândia por Nattharom et al. (2021) onde o sequestro de carbono de árvores entre 15 e 20 anos foi de 114 t ha⁻¹. O mesmo foi relatado a Índia por Pasha e Dadhwal (2024), com assimilações de carbono de 170.4 t ha⁻¹, 317,1 t ha⁻¹ e 223,4 t ha⁻¹ para biomassas de 362.6 t ha⁻¹, 674,6 t ha⁻¹ e 475,4 t ha⁻¹, respectivamente.

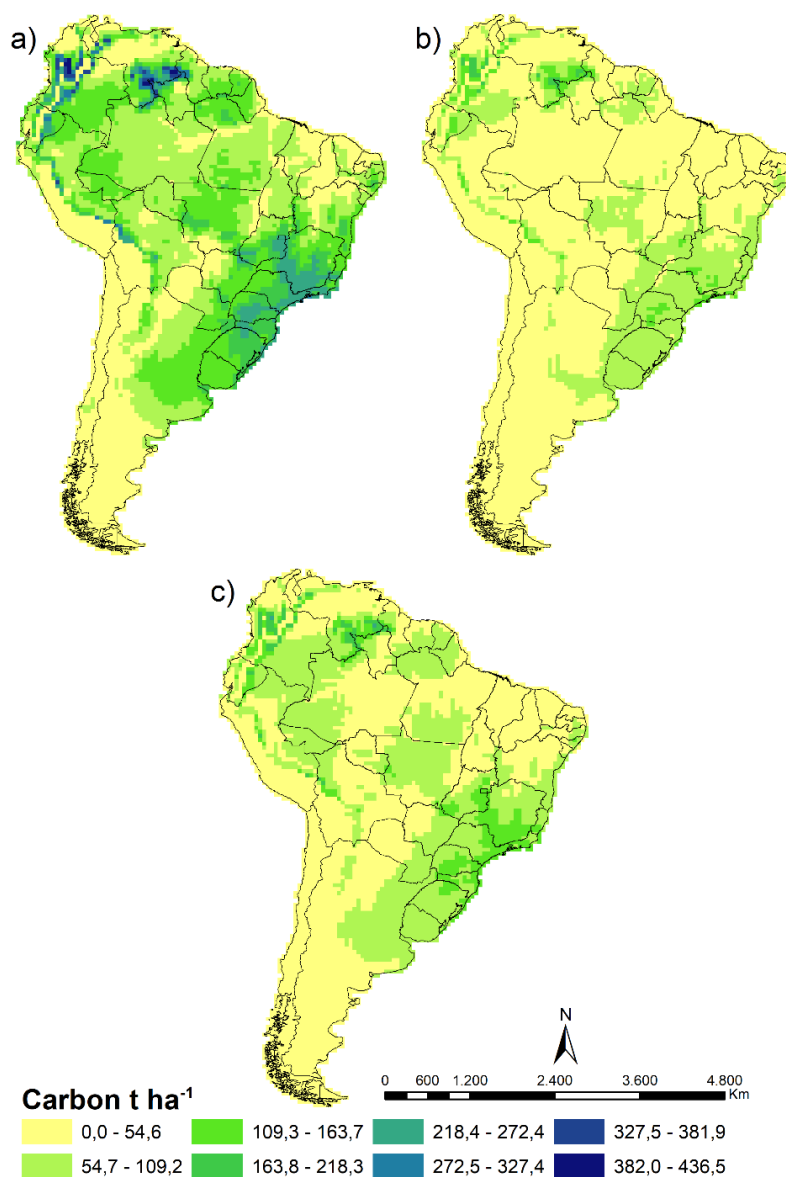


Figura 9 - A) Fixação Potencial de carbono (FPC), B) Fixação Atingível (FAC) e C) Diferença entre a FPC e FAC (FPC - FAC).

3.4 Conclusão

A estimativa de crescimento da seringueira realizada pelo modelo com base fisiológica 3PG indicou que os estados do Paraná, Goiás, MS e toda a região Sudeste do Brasil com destaque para a região da Bacia Hidrográfica do Rio Grande em Minas Gerais Essas regiões reúnem condições naturais favoráveis ao cultivo e têm grande potencial de crescimento da biomassa da seringueira, seguido pelo Norte da Argentina e Amazônia (brasileira e colombiana). As mesmas regiões têm grande potencial de assimilação de carbono na biomassa ao longo de 30 anos. Tais valores foram semelhantes à valores encontrados em literaturas de locais de climas semelhantes. A adoção de um manejo tecnificado como a irrigação pode ampliar e aumentar a produtividade do cultivo com a possibilidade de implantá-la em novas áreas.

Novos estudos podem ser realizados utilizando o 3PG em outras regiões diferentes da América do Sul para outros cultivos, principalmente cultivos intercalares de outras espécies como cacau, macaúba e Urucum que são espécies nativas do Brasil e América do Sul. Pode-se também aprofundar o estudo para pontos específicos onde a produção do Látex é grande, como a região de São José do Rio Preto, Votuporanga, Colina para obter-se dados observados da seringueira nessas regiões e comparar os valores encontrados neste trabalho.

Referências

- Ahmed M, Seraj R, Islam SMS (2020) The k-means algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation. **Electronics (Switzerland)** 9(8):1–12. <https://doi.org/10.3390/electronics9081295>
- Andrade HJ, Orjuela JA, Hernandez C (2022) Above- and below-ground biomass models of *Hevea brasiliensis* and *Theobroma grandiflorum* in the Colombian Amazon. **Colombia Forestal** 25(2):57–69. <https://doi.org/10.14483/2256201X.18464>
- Brahma B, Sileshi GW, Nath AJ, Das AK (2017) Development and evaluation of robust tree biomass equations for rubber tree (*Hevea brasiliensis*) plantations in India. **Forest Ecosystems** 4(1):1–10. <https://doi.org/10.1186/s40663-017-0101-3>
- Castillo MG, Estades CF (2024) Rapid land cover change in agricultural valleys of the Atacama Desert, Chile. **Arid Land Research and Management**. <https://doi.org/10.1080/15324982.2024.2368660>

Coops NC, Ferster CJ, Waring RH, Nightingale J (2009) Comparison of three models for predicting gross primary production across and within forested ecoregions in the contiguous United States. **Remote Sensing of Environment** 113(3):680–690. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.013>

Crespo AM, Souza MN, Silva MAB (2023) **Ciclo do carbono e sistemas agroflorestais na sustentabilidade da produção agrícola: revisão de literatura.** *Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural* 13(14):6–19. <https://doi.org/10.54682/ier.v.13e14.p06.19>

Faria DL, Eugênio TMC, Lopes DE, Protásio TP, Mendes LM, Junior JBG (2021) Particleboards produced with different proportions of *Hevea brasiliensis*: residual wood valorization in higher value-added products. **Ciência e Agrotecnologia** 45:e214520. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145021420>

Fernando PDH, Subasinghe SMCUP, Lokupitiya RS (2024) Allometric models for biomass prediction of *Hevea brasiliensis*. **Environmental Quality Management** 33(4):401–410. <https://doi.org/10.1002/tqem.22099>

Gajardo HA, Morales M, Larama G, Luengo-Escobar A, López D, Machado M, Nunes-Nesi A, Reyes-Díaz M, Planchais S, Savouré A, Gago J, Bravo LA (2024) Physiological, transcriptomic and metabolomic insights of three extremophyte woody species living in the multi-stress environment of the Atacama Desert. **Planta** 260(3):1–20. <https://doi.org/10.1007/s00425-024-04484-1>

Gupta R, Sharma LK (2019) The process-based forest growth model 3-PG for use in forest management: a review. **Ecological Modelling** 397:55–73. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.01.007>

Harris CR, Millman KJ, van der Walt SJ, Gommers R, Virtanen P, Cournapeau D, et al. (2020) Array programming with NumPy. **Nature** 585(7825):357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>

Islam SMZ (2017) Allometric relationships for estimating stem volume of rubber tree (*Hevea brasiliensis* Muell.-Arg.) in Bangladesh. **Open Access Journal of Science** 1(1):1–5. <https://doi.org/10.15406/oajs.2017.01.00006>

Li X, Wang X, Gao Y, Wu J, Cheng R, Ren D, et al. (2023) Comparison of different important predictors and models for estimating large-scale biomass of rubber plantations in Hainan Island, China. **Remote Sensing** 15(13):1–17. <https://doi.org/10.3390/rs15133447>

Ling Z, Shi Z, Gu S, Wang T, Zhu W, Feng G (2022) Impact of climate change and rubber (*Hevea brasiliensis*) plantation expansion on reference evapotranspiration in Xishuangbanna, Southwest China. **Frontiers in Plant Science** 13:830519. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.830519>

Maggiotto SR, Oliveira D, Marur CJ, Stivari SMS, Leclerc M, Wagner-Riddle C (2014) Potencial de sequestro de carbono em seringais no noroeste do Paraná, Brasil. **Acta**

<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v36i2.17404>

Moreno MB, Ferreira M, Gonçalves PS, Mattoso LHC (2003) Avaliação do látex e da borracha natural de clones de seringueira no Estado de São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 38(5):543–550.

Nattharom N, Roongtawanreongsri S, Bumrungsri S (2021) The economic value of ecosystem services of rubber-based agroforest plantations in South Thailand. **Journal of Sustainability Science and Management** 16(5):247–262. <https://doi.org/10.46754/JSSM.2021.07.016>

Nogueira RF, Cordeiro SA, Leite AMP, Binoti MLMS (2015) Mercado de borracha natural e viabilidade econômica do cultivo da seringueira no Brasil. **Nativa** 3(2):143–149. <https://doi.org/10.14583/2318-7670.v03n02a12>

Nyamekye E, Ramani T (2017) Assessing the potential contribution of latex from rubber (*Hevea brasiliensis*) as a carbon sink. **ResearchGate Preprint**. <https://www.researchgate.net/publication/317224386>

Olukanmi P, Nelwamondo F, Marwala T (2020) Rethinking k-means clustering in the age of massive datasets: a constant-time approach. **Neural Computing and Applications** 32(19):15445–15467. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04673-0>

Pasha SV, Dadhwal VK (2024) Age-based stratification to estimate aboveground biomass (AGB) and carbon stocks of rubber plantations in Tripura. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing** 52(4):711–721. <https://doi.org/10.1007/s12524-023-01751-8>

Perron T, Mareschal L, Laclau JP, Deffontaines L, Deleporte P, Masson A, et al. (2021) Dynamics of biomass and nutrient accumulation in rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations on two soil types: implications for nutrient management during the immature phase. **Industrial Crops and Products** 159:113084. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113084>

Pethin D, Nakkanong K, Nualsri C (2015) Performance and genetic assessment of rubber tree clones in southern Thailand. **Scientia Agricola** 72(4):306–313. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0354>

Purwaningrum Y, Asbur Y, Junaidi (2019) Latex quality and yield parameters of *Hevea brasiliensis* clone PB 260 for different tapping and stimulant application frequencies. **Chilean Journal of Agricultural Research** 79(3):347–355. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000300347>

Rukkhun R, Iamsaard K, Sdoodee S, Mawan N, Khongdee N (2020) Effect of high-frequency tapping system on latex yield, tapping panel dryness, and biochemistry of young hillside tapping rubber. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca** 48(4):2358–2367. <https://doi.org/10.15835/48412045>

Satakhun D, Chayawat C, Sathornkich J, Phattaralerphong J, Chantuma P, Thaler P, et al. (2019) Carbon sequestration potential of rubber-tree plantation in Thailand. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 526(1):012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/526/1/012036>

Singh AK, Liu W, Zakari S, Wu J, Yang B, Jiang XJ, et al. (2021) A global review of rubber plantations: impacts on ecosystem functions, mitigations, and policies for sustainable cultivation. **Science of the Total Environment** 796:148948. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148948>

Vega-Nieva DJ, Valero E, Picos J, Jiménez E (2015) Modeling the above- and belowground biomass of planted and coppiced *Eucalyptus globulus* stands in NW Spain. **Annals of Forest Science** 72(7):967–980. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0493-6>

Yang X, Blagodatsky S, Liu F, Beckschäfer P, Xu J, Cadisch G (2017) Rubber tree allometry, biomass partitioning and carbon stocks in mountainous landscapes of subtropical China. **Forest Ecology and Management** 404:84–99. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.013>

Yang X, Blagodatsky S, Marohn C, Liu H, Golbon R, Xu J, Cadisch G (2019) Modelling rubber tree growth and latex yield under climate change. **Forest Ecology and Management** 439:55–69. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.028>

Zandalinas SI, Mittler R (2022) Plant responses to multifactorial stress combination. **New Phytologist** 234(4):1161–1167. <https://doi.org/10.1111/nph.18087>

Python Software Foundation (2024) *Python Language Reference*, version 3.x. Available at: <https://www.python.org>

Landsberg JJ, Waring RH (1997) A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management** 95:209–228.

de Lemos CZ, Carrero O, Hakamada R, Silva LF, Ferreira K, Stape JL (2023) 3-PG model enhancement by modifying soil water availability in a tropical *Eucalyptus urophylla* plantation. **Scientia Forestalis** 51:1–10. <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.07>

Elli EF, Sentelhas PC, Bender FD (2020) Impacts and uncertainties of climate change projections on *Eucalyptus* plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management** 474:118365. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118365>

Elli EF, Sentelhas PC, Freitas CH, Carneiro RL, Alvares CA (2019) Assessing the growth gaps of *Eucalyptus* plantations in Brazil – magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management** 451:117464. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117464>

Florêncio GWL, Martins FB, Fagundes FFA (2022) Climate change on *Eucalyptus* plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil.

Industrial Crops and Products 188:115538.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538>

Hakamada R, Coronado JP, Falcão CJLM, Carrero O, Sulbarán-Rangel B (2025) 3PG model to estimate productivity, carbon storage and aridity index of *Eucalyptus* plantations in Mexico. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** 16(87):127–152.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i87.1474>

HN Palma J, Hakamada R, Moreira GG, Nobre S, Rodriguez LCE (2021) Using 3PG to assess climate change impacts on management plan optimization of *Eucalyptus* plantations: a case study in Southern Brazil. **Scientific Reports** 11(1):1–13.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-81907-z>

Hunter JD (2007) Matplotlib: A 2D graphics environment. **Computing in Science and Engineering** 9(3):90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>

Karki R, Qi J, Gonzalez-Benecke CA, Zhang X, Martin TA, Arnold JG (2023) SWAT-3PG: improving forest growth simulation with a process-based forest model in SWAT. **Environmental Modelling and Software** 164:105705.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105705>

Karki R, Qi J, Zhang X, Srivastava P (2025) Evaluating SWAT-3PG simulation of hydrologic and water quality processes in a forested watershed: a case study in the St. Croix River Basin. **Journal of Hydrology** 648:132393.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132393>

McKinney W (2010) Data structures for statistical computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference* 51–56.

Sabino W, Costa L, Andrade T, Teixeira J, Araújo G, Acosta AL, Carvalheiro L, Giannini TC (2022) Status and trends of pollination services in Amazon agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 335:108012.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108012>

Sands P (2004) Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data collection and parameter assignment. **Public CRC for Sustainable Production Forestry**, Hobart, Australia.

Sands PJ, Landsberg JJ (1997) Parameterisation of 3-PG for plantation-grown *Eucalyptus globulus*. **CSIRO Forestry and Forest Products Technical Report**.

Silva GCC, Neves JCL, Marcatti GE, Soares CPB, Calegario N, Junior CAA, et al. (2023) Improving 3-PG calibration and parameterization using artificial neural networks. **Ecological Modelling** 479:110301.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110301>

Sondermann M, Chou SC, Lyra A, Latinovic D, Siqueira GC, Junior WC, et al. (2022) Climate change projections and impacts on *Eucalyptus* plantations around the Doce River basin, Minas Gerais, Brazil. **Climate Services** 28:100327.
<https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100327>

CAPÍTULO 4 – Considerações Finais

O 3PG-Tuning é uma versão *open source* em Python do modelo 3PG, desenvolvida para automatizar a calibração de parâmetros em espécies arbóreas. A calibração para *Eucalyptus globulus* Labill. foi bem-sucedida, resultando em estimativas consistentes de biomassa e madeira. Seria interessante também executar a simulação no Brasil visto que essas condições são muito variadas, considerando as diferentes regiões onde se planta o *Eucalyptus globulus* Labill. no país.

A simulação para a seringueira indicou alto potencial de sequestro de carbono especialmente no Sudeste, Paraná, Goiás e Mato Grosso do Sul, além de regiões da Amazônia e norte da Argentina, destacando áreas favoráveis ao cultivo sustentável.

Os resultados reforçam o potencial do 3PG como ferramenta para políticas de agricultura de baixo carbono e planejamento agroflorestal. No entanto, o modelo ainda precisa ser testado em outros cultivos e em pesquisas mais aprofundadas com a seringueira e demais espécies para ampliar sua aplicabilidade.