

# RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 27/03/2021.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA PARA ESTIMAÇÃO  
DE PRODUTIVIDADE DE ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis*  
ST. HIL.) NA REGIÃO SUL DO BRASIL**

**Mary Jane Nunes Carvalho**

**Engenheira Agrônoma**

**2020**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA PARA ESTIMAÇÃO  
DE PRODUTIVIDADE DE ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis*  
ST. HIL.) NA REGIÃO SUL DO BRASIL**

**Mary Jane Nunes Carvalho**

**Orientador: Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim**

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 (Ciência do solo).

**2020**

C331m	<p>Carvalho, Mary Jane Nunes</p> <p>Modelagem agrometeorológica para estimação de produtividade de erva-mate (<i>Ilex paraguariensis</i> St. Hil.) na região Sul do Brasil / Mary Jane Nunes Carvalho. -- Jaboticabal, 2020</p> <p>61 p. : tabs., mapas</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal</p> <p>Orientador: Glauco de Souza Rolim</p> <p>1. Agrometeorologia. 2. Clima. 3. Modelagem. 4. Modelos. 5. Produtividade. I. Título.</p>
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA PARA ESTIMAÇÃO DE  
PRODUTIVIDADE DE ERVA-MATE (*Ilex Paraguariensis* ST. HIL.) NA  
REGIÃO SUL DO BRASIL**

**AUTORA: MARY JANE NUNES CARVALHO**

**ORIENTADOR: GLAUCO DE SOUZA ROLIM**

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM  
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Dra. ANGÉLICA PRELA PANTANO  
Instituto Agronômico de Campinas / APTA / Campinas P/



Profa. Dra. AMANDA LIZ PACÍFICO MANFRIM PERTICARRARI  
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal P/



Jaboticabal, 27 de março de 2020

## **DADOS CURRICULARES DA AUTORA**

**MARY JANE NUNES CARVALHO-** Filha de João Batista Pinto Carvalho e Marcelina Diniz Nunes Carvalho, nasceu em 17 de setembro de 1994, na cidade de São Luís, Estado do Maranhão, Brasil. Ingressou no curso de Engenharia Agrônoma da Universidade Estadual do Maranhão- UEMA, campus Paulo VI, de São Luís-MA, em agosto de 2012. Onde foi monitora das disciplinas Produção e tecnologia de sementes e Silvicultura no ano de 2016. Participou Laboratório de Extensão (LABEX), fazendo parte do Grupo de Produção vegetal, foi bolsista de projetos de extensão universitária no período de 2013 a 2014. Foi bolsista na modalidade de iniciação científica da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Maranhão (FAPEMA), no período de 2014 a 2017. Em janeiro de 2018, obteve o título de Engenheira Agrônoma. Iniciou o curso de pós-graduação *Stricto sensu* na modalidade Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) em agosto de 2018, na Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, no Campus de Jaboticabal, no Departamento de Ciências Exatas sob a orientação do Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim, atuando em pesquisas na área de Agrometeorologia e Modelagem. É integrante do grupo de pesquisa: “Group of Agrometeorological Studies” (GAS), da Unesp – Câmpus de Jaboticabal. Em março de 2020 submeteu-se à banca para a defesa de Dissertação.

“ O que adquire entendimento ama a sua alma; o que conserva a inteligência  
achará o bem”

**Provérbios 19:8**

## **DEDICO**

A Deus, pela dádiva da vida.

Aos meus pais João Batista Pinto Carvalho e Marcelina Diniz Nunes Carvalho, exemplos de vida e dedicação.

## **OFEREÇO**

À toda minha família, pelo incentivo e força nessa caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela dádiva da vida, pois sem Ele eu não teria conseguido chegar até aqui.

A minha família pelo amor incondicional, especialmente meus pais, João Batista Pinto Carvalho e Marcelina Diniz Nunes Carvalho por terem me ensinado a ser perseverante e a lutar por aquilo em que acredito.

Aos meus irmãos, Marcy Jane, Mary Diely, Jardson e Jarlison, pelo apoio, pelas palavras amigas, por sempre acreditaram e confiaram em mim.

Ao meu orientador professor Dr. Glauco de Souza Rolim, pela orientação, incentivo, dedicação, pelos seus ensinamentos que foram fundamentais para que pudesse realizar mais essa etapa da minha vida.

As professoras membras da banca de defesa Profa. Dra. Amanda Liz Pacífico Manfrim Perticarrari e Profa. Dra. Angélica Prela Pantano, pelas contribuições atribuídas a minha pesquisa.

Aos meus grandes amigos Jonathan Viana, Aline Moreno, Valter Barbosa, Eliane Nascimento, Maria Elisa Vicentini e Kamila Meneses, obrigada pelo apoio, conselhos, companhia, por tudo que boas amizades são capazes de proporcionar.

Ao Grupo de Pesquisa em Agrometeorologia da Unesp - GAS, pelo recebimento no grupo e pelos conhecimentos compartilhados.

Aos meus amigos e colegas de departamento, Kárita Almeida, Nayane Maia, Washington Pereira, Tatiana Santos, Lígia Negri, Paulo Alexandre, pela companhia ao longo desse tempo.

As meninas da Rep, Karine, Ana Paula, Áurea, Fernanda pelo convívio e amizade, vocês são incríveis.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas, Maria José Servidone Trizólio, Shirley Aparecida Martineli de Sousa, Adriana Elisabete Takakura, por me receberem bem no departamento, e pelo carinho.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus de Jaboticabal, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pela oportunidade em cursar o mestrado.

Enfim, agradeço a todos, professores, amigos e conhecidos que direta ou indiretamente em algum momento da vida contribuíram para minha formação.

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

**Muito obrigada!**

## SUMÁRIO

	Página
<b>RESUMO</b> .....	xii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	xiv
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xv
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xvi
<b>CAPÍTULO 1- Considerações Gerais</b> .....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Revisão de Literatura.....	3
1.2.1 Importância econômica da erva-mate para o Sul do Brasil .....	3
1.2.2 Fatores que afetam o desenvolvimento e produtividade dos cultivos....	4
1.2.2.1 Solo e produtividade da erva-mate .....	4
1.2.2.2 Clima e produtividade da erva-mate .....	5
1.2.2.3 Altitude e Precipitação .....	5
1.2.2.4 Temperatura do ar .....	5
1.2.2.5 Radiação.....	6
1.2.2.6 Déficit hídrico.....	6
1.2.3 Fenologia reprodutiva da erva-mate.....	7
1.2.4 Modelagem e aplicações.....	8
1.2.4.1 O que é modelagem .....	8
1.2.4.2 Uso de modelos na agricultura .....	9
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO 2- Modelagem agrometeorológica para estimação de produtividade de erva-mate (<i>Ilex paraguariensis</i> St. Hil.) na região Sul do Brasil</b> .....	<b>16</b>
Resumo.....	16
Abstract.....	17

2.1 Introdução.....	18
2.2 Material e Métodos.....	22
2.2.1 Localização e seleção das áreas de estudo.....	22
2.2.2 Dados Meteorológicos.....	24
2.2.3 Balanço Hídrico.....	24
2.2.4 Análise de dados.....	25
2.2.5 Avaliação dos modelos.....	28
2.3 Resultados e discussão.....	30
2.4 Conclusão.....	39
Referências.....	40

## MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA PARA ESTIMAÇÃO DE PRODUTIVIDADE DE ERVA-MATE (*Ilex Paraguariensis* ST. HIL.) NA REGIÃO SUL DO BRASIL

**RESUMO** – A estimação de produtividade usando modelos agrometeorológicos é uma técnica de estratégia robusta para a realização do planejamento, uma vez que o conhecimento prévio das safras agrícolas facilitam as tomadas de decisões. O Objetivo deste estudo foi identificar e avaliar a influência das variáveis agrometeorológica em diferentes fases de desenvolvimento da cultura, para propor modelos agrometeorológicos com fim de estimar produtividade para erva-mate nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Foram utilizados dados meteorológicos diários de temperatura e precipitação obtidos na plataforma NASA-POWER para um período de 28 anos, referentes a 38 localidades. Realizou-se balanço hídrico para obtenção das variáveis, evapotranspiração, déficit hídrico, excedente e armazenamento. Os dados de produtividade foram obtidos na plataforma IBGE no sistema de Recuperação Automática-SIDRA. Para o entendimento da dispersão espacial foi feita análise de agrupamento utilizando cluster hierárquico aglomerativo. Foi feita estatística descritiva para cada grupo determinado por meio de box plot. Para a modelagem de produtividade de erva-mate foram utilizados modelos de regressão linear múltipla (RLM), e modelos de inteligência artificial como o Random Forest Regressor (RF) e Redes Neurais Multilayer perceptron (MLP) usando sempre as variáveis independentes os elementos meteorológicos decendiais: temperatura e precipitação, e os derivados do balanço hídrico: ARM, ETR, DEF e EXC, e como variável dependente a produtividade. Os resultados mostram que os valores de RLM não apresentaram resultados satisfatórios se comparado aos modelos RF e MLP que apresentaram melhor desempenho. Os modelos agrometeorológicos podem ser utilizados para estimação e previsões de produtividades e permitem ao setor agrícola reduzir riscos na produção e aumentar rentabilidade dos cultivos.

**Palavras-chave:** agrometeorologia, clima, modelagem, modelos, produtividade

## **AGROMETEOROLOGICAL MODELING FOR YERBA-MATE PRODUCTIVITY ESTIMATION (*Ilex paraguariensis* ST. HIL.) IN SOUTHERN BRAZIL**

**ABSTRACT-** Productivity estimation using agrometeorological models is a robust strategy technique for planning, since prior knowledge of agricultural crops facilitates decision making. The objective of this study was to identify and evaluate the influence of agrometeorological variables in different stages of crop development, to propose agrometeorological models in order to estimate productivity for yerba mate in the states of Parana, Santa Catarina and Rio Grande do Sul. Daily weather and temperature meteorological data obtained on the NASA-POWER platform for a period of 28 years, referring to 38 locations. Water balance was performed to obtain the variables, evapotranspiration, water deficit, surplus and storage. The productivity data were obtained on the IBGE platform in the SIDRA Automatic Recovery system. For the understanding of spatial dispersion, cluster analysis was performed using an agglomerative hierarchical cluster. Descriptive statistics were made for each group determined using a box plot. For the modeling of yerba mate productivity, multiple linear regression models (RLM) were used, as well as artificial intelligence models such as Random Forest Regressor (RF) and Multilayer Perceptual Neural Networks (MLP), always using the independent variables of the decennial meteorological elements: temperature and precipitation and water balance derivatives: ARM, ETR, DEF and EXC and as a dependent variable, productivity. The results show that those values of RLM did not present satisfactory results when compared to the RF and MLP models that presented better performance. Agrometeorological models can be used to estimate and forecast yields and allow the agricultural sector to reduce risks in production and increase profitability of crops.

**Keywords:** agrometeorology, climate, models, modeling, productivity

## LISTA DE ABREVIATURAS

**AHC**- Cluster hierárquico aglomerativo

**ARM**- Armazenamento de água no solo

**°C** - Graus Celsius

**CV**- Validação cruzada

**DEF**- Déficit hídrico

**ETP**- Evapotranspiração potencial

**ETR**- Evapotranspiração real

**EUR**- Eficiência do uso da radiação

**EXC**- Excedente hídrico

**IA**- Inteligência Artificial

**MLP**- Multilayer perceptron

**NASA / POWER** - NASA's Prediction of Worldwide Energy Resources

**P** - Precipitação

**R<sup>2</sup>** - Coeficiente de determinação

**RF**- Random forest regressor

**RLM**- Regressão Linear Múltipla

**RMSE**- Raiz quadrada do erro-médio (RMSE - Root Mean Square Error)

**RNA**- Redes neurais artificiais

**SIDRA**- Sistema de Recuperação Automática

**T**- Temperatura do ar

## LISTA DE FIGURAS

### Página

<b>Figura 1.</b> Principais regiões produtoras de erva-mate, no Sul do Brasil: Paraná (PR), Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS).....	21
<b>Figura 2.</b> Fenologia típica da erva-mate em decênios das regiões produtivas dos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Legenda $y-1$ = Ano anterior, $y$ = Ano de colheita, os números correspondem aos decênios.....	25
<b>Figura 3.</b> Dendograma de produtividades de erva-mate $t\ ha^{-1}$ .....	29
<b>Figura 4.</b> Mapa com base no índice de similaridade considerando a produtividade de erva-mate ( $t\ ha^{-1}$ ) no Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná.....	30
<b>Figura 5.</b> Box Plot para as variáveis T, P, ETR, ARM, DEF, EXC e produtividade nos grupos determinados pela análise de cluster.....	31
<b>Figura 6.</b> Correlações entre elementos meteorológicos e a fenologia da erva-mate.....	32
<b>Figura 7.</b> Dispersão entre os valores de produtividade estimados e observados do modelo Random Forest Regressor (RF).....	35
<b>Figura 8.</b> Dispersão entre os valores de produtividade estimados e observados do modelo de Redes Neurais –MLP.....	36

## LISTA DE TABELAS

	<b>Página</b>
<b>Tabela 1.</b> Locais, coordenadas geográficas e altitudes, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul.....	22
<b>Tabela 2.</b> Modelo de Regressão linear múltipla para os grupos 1,2,3,4 e grupo geral.....	33
<b>Tabela 3.</b> Comparação dos modelos de Regressão Linear Múltipla, Random Forest Regressor e Multilayer Perceptron.....	37

## **CAPÍTULO 1- Considerações Gerais**

### **1.1 Introdução**

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.) da família botânica Aquifoliaceae é uma planta arbórea originária das regiões subtropicais e temperadas da América do Sul, encontra-se principalmente no Brasil, Argentina, Paraguai, os principais países do mundo produtores de erva-mate (Ross et al., 2017; Wendling et al., 2013).

De hábito de consumo dos povos indígenas da região Sul-Americana, teve seu consumo difundido pelos colonizadores europeus na forma de bebidas como o chimarrão e o tererê fazendo parte do hábito alimentar, da cultura, das relações comerciais e políticas dos estados da região Sul do Brasil (Freitas et al., 2016).

As principais formas de consumo de erva-mate é o chá tradicional, que é consumido por milhões de pessoas na América do Sul, às vezes substituindo o café, devido ao seu efeito estimulante (Albas et al., 2014; Klering et al., 2008). Na região Sul do país os produtos de erva-mate são consumidos principalmente na forma de chimarrão e tererê, nos Estados Unidos, Alemanha e Síria é utilizada para a produção de “chá” e bebidas energéticas e em outros países como Espanha, Itália, Austrália, França, Japão, Coréia e Rússia o consumo de erva-mate se expandiu devido ao seu sabor e propriedades farmacêuticas (Cardozo Junior e Morand, 2016).

Em termos mundiais a Argentina destaca-se como o maior produtor de erva-mate. Os cultivos de erva-mate na Argentina, concentram-se nas províncias de Misiones (85%) e Corrientes (15%), já no Brasil estão concentrados nos estados vizinhos à província de Misiones, Rio Grande do Sul Paraná e Santa Catarina; e no Paraguai, em Itapúa e Alto Paraná del Paraguay, também na fronteira com Misiones. A produção média dos três países é cerca de 500.000 toneladas/ano (Cañete et al., 2017).

O Brasil vem ganhando destaque no cenário produtivo e comercial, produzindo atualmente mais de 500 mil toneladas de folha verde. Em 2018 foram produzidas 546.618 toneladas de erva-mate, em uma área de 77.713 hectares, resultando em uma produção média de 7.033 ton ha<sup>-1</sup> (IBGE, 2018).

A produção de erva-mate concentra-se nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Sendo o Rio Grande do Sul o estado brasileiro de maior representatividade em termos de produtividade, com 43% de produção nacional e 37% de área cultivada com erva-mate no país (IBGE,2018).

A cadeia produtiva de erva-mate destaca-se no cenário nacional por seu impacto ambiental, social e econômico. O cultivo de erva-mate representa fonte de renda para muitos agricultores, gerando cerca de 700 mil empregos diretos, sendo cultivada em 180 mil propriedades e 480 municípios do país (Medrado e Vilcahuaman, 2014).

A produção de erva-mate assim como outros cultivos agrícolas depende do clima e sua variabilidade. Seca, geada, chuva excessiva, granizo e diversos agentes biológicos, entre outras adversidades, podem afetar diversas culturas em diferentes estágios de desenvolvimento, essas variáveis podem resultar em perdas ou ganhos de produtividades (Ozaki, 2008).

As condições climáticas são determinantes na qualidade da erva produzida (Camotti Bastos et al., 2018). A erva-mate apresenta períodos fenológicos bem definidos, os quais podem ser alterados conforme o microclima de algumas regiões. A temperatura ideal para desenvolvimento das plantas encontra-se em torno de 18°C. Plantas de erva-mate adultas respondem fortemente à condições de alta luminosidade (monocultura), onde mostram mais intensa emissão de folhas e formação de área foliar do que quando cultivadas sob o sub-bosque (Rakocevic e Martim, 2011). A fisiologia das folhas de erva-mate muda quando as plantas são cultivadas em monocultura (Rakocevic e Martim, 2011), e isso afeta fortemente as características do chimarrão obtido (Rakocevic et al., 2008). Estudos comprovam que o sombreamento é capaz de melhorar a qualidade da erva-mate final. Ressalta-se ainda que a composição química da planta varia com o tipo de solo, clima, época de amostragem, idade da planta e, principalmente, pelas características genéticas (Malavolta, 1980; Brondani et al., 2008).

A crescente demanda em valorizar e qualificar a cadeia produtiva da erva-mate, além de expandir o mercado consumidor, intensificou os estudos sobre a dinâmica do setor ervateiro, melhoramento genético, tecnologias de produção e qualidade dos

produtos (Santin et al., 2019; Santin et al., 2017). Porém, estudos para modelos agrometeorológicos com fins de estimação de produtividades são escassos. Até o momento pouco se foi estudado sobre modelos agrometeorológicos para estimação de produtividade da erva-mate.

Devido à importância econômica e cultural deste cultivo este estudo teve como objetivo desenvolver modelos agrometeorológicos para a estimação de produtividade para erva-mate nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

## **2.4 Conclusão**

Os modelos de Machine Learning utilizados foram eficientes para estimativa de produtividade da erva-mate. O modelo Random Forest Regressor fornece estimativas mais precisas de produtividade em relação à Regressão Linear Múltipla e Multilayer Perceptron.

## Referências

- Acock B, Acock MC (19991) Potential for Using Long-Term Field Research Data to Develop and Validate Crop Simulators. **Agronomy Journal** 83:56-61.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements – FAO - paper 56. Rome, 297p.
- Alves GR, Teixeira IR, Melo FR, Souza, RTG, Silva, AG (2018). Estimating soybean yields with artificial neural networks. **Acta Scientiarum Agronomy**, 40:1-9.
- Aparecido LEO (2016) **Produtividade e qualidade de bebida natural do cafeeiro**. 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Produção Vegetal) - Unesp, Jaboticabal.
- Aparecido LEO, Reinaldo JC, Rolim GDS, Martotato LG, Meneses KC, Valeriano TTB (2016) Neural networks in climate spatialization and their application in the agricultural zoning of climate risk for sunflower in different sowing dates. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 65: 1477-1492.
- Assis JP, Dourado Neto D, Reichardt K, Manfron PA, Martin TM, Bonnacarrère RAG (2006) Dados climáticos simulados e produtividade potencial do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 41:731-737.
- Bardin L, Pedro Júnior MJ, Moraes JFL de (2010) Estimativa das temperaturas máximas e mínimas do ar para a região do Circuito das Frutas, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 14:618–624.
- Basso BD, Cammarano EC (2013) Revisão dos métodos de previsão do rendimento das culturas e dos sistemas de alerta precoce. Em Anais da primeira reunião do comitê consultivo científico da estratégia global para melhorar as estatísticas agrícolas e rurais, sede da FAO, Roma, Itália 18-19.
- Bhering, SB, Chagas CS, Carvalho J, Waldir P, Nilson R, Calderano FB, Pinheiro HSK. (2016). Mapeamento digital de areia, argila e carbono orgânico por modelos Random Forest sob diferentes resoluções espaciais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 9:1359-1370.
- Bocco M, Willington E, Arias M (2010) Comparison of Regression and Neural Networks Models to Estimate Solar Radiation. **Chilean journal of agricultural research** 70:428–435.
- Bracesco N, Sanchez AG, Contreras V, Menini TAG (2011) Avanços recentes na pesquisa de *Ilex paraguariensis* St: **Minireview. Jornal de Etnofarmacologia** 136:376–384.
- Breiman L (2001) **Random forests**. Machine Learning. Califórnia, 5–32p.
- Camotti BM, Cherobim VF, Reissmann CB, Fernandes Kaseker J, Gaiad S (2018) Yerba mate: Nutrient levels and quality of the beverage depending on the harvest season. **Journal Food Composition and Analysis** 69:1–6.
- Cañete L, Argüello B del, Pucciarelli Román A (2017) Estudio de la flora microbiana de la yerba mate durante las etapas de su elaboración. **Revista Ciencia y Tecnología** 27: 51–57.

Cardozo Junior EL, Morand C (2016) Interest of mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) as a new natural functional food to preserve human cardiovascular health - A review. **Journal of Functional Foods** 21:440–454.

Caron BO, Schmidt D, Manfron PA, Behling A, Eloy E, Busanello C (2014) Efficiency of the use of solar radiation for plants *Ilex paraguariensis*. **Ciência Florestal** 24:257–265.

Chimonyo VGP, Modi AT, Mabhaudhi T (2016) Assessment of sorghum-cowpea intercrop system under water-limited conditions using a decision support tool. **Water SA** 42:1-15.

Corrêa STR, Lorençoni R, Neto DD, Scarpere FV, Vivian R, Ruiz ET (2011) Aplicações e limitações da modelagem em agricultura- Revisão. **Brazilian Journal of agriculture** 86: 1-13.

Daniel O (2009) **Erva-mate Sistema de produção e processamento industrial**, Dourado: UEMS 288p.

Dourado-Neto D, Teruel DA, Reichardt K, Nielsen DR, Frizzone JA, Bacchi OOS (1998) Principles of crop modeling and simulation: I. uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola** 55:46–50.

Everingham Y, Sexton J, Skocaj D, Inman-Bamber G (2016) Accurate prediction of sugarcane yield using a random forest algorithm. **Agronomy Sustainable Development** 36: 27.

Feng P, Wang B, Lui LD, Waters C, Yu Q (2019) Incorporating machine learning with biophysical model can improve the evaluation of climate extremes impacts on wheat yield in south-eastern Australia. **Agricultural and Forest Meteorology** 275: 100-113.

Freitas RA, Marques SSS, Souza TN, Silveira CCN, Silva ALN, Borges JFC, Souza JHK (2016) O consumo de chimarrão e o câncer de esôfago. **Brazilian Journal of Surgery and Clinical Research** 14:118–123.

Gopal OS, Bhargavi R (2019) Uma nova abordagem para a previsão eficiente da produção agrícola. **Computers and Electronics in Agriculture** 165:1–22.

Grimm R, BEHRENS T, MÄRKER M, ELSENBEER H (2008) Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island - Digital soil mapping using Random Forests analysis **Geoderma** 146:102-113.

Guimarães AM, Caires EF, da Silva KS, da Rocha JCF (2015) Estimating gypsum requirement under no-till based on machine learning technique. **Revista Ciência Agronômica** 46:250–257.

Haykin S (2008). **Redes neurais: Princípios e prática**. Bookman.

Holzworth DP, Neil IH, Peter GV, Eric JZ, Neville IH, Greg McLean, Karine C, “APSIM - Evolução para uma nova geração de simulação de sistemas agrícolas”. **Modelagem e Software Ambiental** 327–350.

Hoogenboom G, Porter CHV, Shelia KJ, Boote U, Singh JW, White LA Hunt R, Ogoshi, JI Lizaso, J. Koo, S. Asseng, A. Singels LM e JJ. Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT) Versão 4.7.5 478 (<https://DSSAT.net>). **Gainesville, Flórida, EUA, 2019.**

IBGE, (2019). Produção Agrícola Municipal – PAM In: IBGE. Sidra: sistema IBGE de recuperação automática. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>.

Janitza S, Tutz G, Boulesteix AL (2016) Random forest for ordinal responses: prediction and variable selection. **Computational Statistics & Data Analysis** 9: 57-73.

Jiang RHW, Zhou W, Hou Y, Yang JY, He P (2019) Explorando estratégias de manejo para melhorar a produtividade do milho e a eficiência do uso de nitrogênio no nordeste da China, usando os modelos DNDC e DSSAT. **Computers and Electronics in Agriculture** 166: 104-988.

Jones JW, Antle JM, Basso B, Boote KJ, Conant RT, Foster I, Keating BA (2017). Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. **Agricultural systems** 155: 269-288.

Jones, JW, G. Hoogenboom, CH Porter, KJ Boote, WD Batchelor, LA Hunt P, Wilkens, U. Singh AG e JR (2003) Harvesting System Model DSSAT. **European Journal Agronomy** 8:235–265.

Keating BA, Carberry OS, Hammer GL, Probert ME, Robertson MJ, Holzworth D & McLean G (2003) An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European journal of agronomy** 18: 267-288.

King A (2017) The future of agriculture. **Nature**, v. 544, n. 7651, p. 21-23.

Klering EV, Fontana DC, Berlato MA, Filho AC (2008) Modelagem agrometeorológica do rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 43:549-558.

Leroux L, Castets M, Baron C, Escorihuela MJ, Begue A, Visto D (2019) Maize Yilde estimation in West Africa from crop process- induced combinations of multi-domain remote sensing índices. **European Journal of Agronomy** 108:11-26.

Liaw A, Wiener M (2002) Classification and regression by random Forest. **R News** 2:18-21.

Martins FB, Pereira RA de A, Pinheiro MVM, Abreu MC (2014) Desenvolvimento foliar em duas cultivares de oliveira estimado por duas categorias de modelos. **Revista Brasileira de Meteorologia** 29:505–514.

Mazuchowski, J.Z., Maccari, A. Junior. E. S (2003) Influência de diferentes condições de radiação solar sobre o crescimento morfológico da erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hill.) Congresso sul-americano da erva-mate 3:256–257.

- Meier M, Souza E de, Francelino MR, Fernandes Filho EI, Schaefer CEGR (2018) Digital Soil Mapping Using Machine Learning Algorithms in a Tropical Mountainous Area. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 42:1–22.
- Moreto VB, Aparecido LEO, Rolim GS, Moraes JR da SC (2018) Agrometeorological models for estimating sweet cassava yield. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 48:43–51.
- Murtagh FA (1983) Survey of recente advances in hierarchical clustering algorithms. **Computer Journal** 26:354–359.
- Oliveira SV, Waquil PD (2017) Dinâmica de produção e comercialização da erva-mate no Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural** 45: 750-756.
- Passioura JB (1973) Sense and nonsense in crop simulation. **Journal of the Australian Institute of Agricultural Science** 39:181-183.
- Pires, EZ, Stedille LIB, Machado S, Mantovani A, Bortoluzzi RLC (2014) Biologia reprodutiva de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil) em remanescentes de Floresta Ombrófila Mista Altomontana. **Journal of Agroveterinary Sciences** 13:171-180.
- Rakocevic M, Martim SF (2011) Time series in analysis of yerba-mate biennial growth modified by environment. **International Journal Biometeorology** 55:161–171.
- Rolim GDS, Novo MCSS, Pantano AP, Trani PE (2011) Modelagem agrometeorologica para estimação do desenvolvimento e da produção de jilo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 8:832–837.
- Rolim GS, Camargo MBP, Grosselilania D, De Moraes JFL (2007) Classificação climática de koppen e de thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia** 66:711–720.
- Rosa VGC, Moreira MA, Rudorff BFT, Adami M (2010) Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorologico-espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 45:1478–1488.
- Ross S, Arriaga ME, Pechi E (2017) Establecimiento in vitro de Yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) nativa de Uruguay. **Agrociencia Uruguay** 21:15–23.
- Russell S & Norvig P (2009). Inteligência Artificial: uma abordagem moderna Londres, Reino Unido, Prentice-Hall, 905p.
- Santin D, Benedetti EL, Barros NF de, Almeida IC de Simiqueli GF, Neves JCL, Wendling I, Reissmann CB (2019) Adubação nitrogenada e intervalos de colheita na produtividade e nutrição da erva-mate e em frações de carbono e nitrogênio do solo. **Ciência Florestal** 29:1199.
- Santin D, Benedetti EL, de Barros NF, de Almeida IC, Wendling I (2017) Intervalos de colheita e adubação potássica influenciam a produtividade da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) no Estado do Paraná. **Ciência Florestal** 46:509–518.

- Sayes W, Mouazen AM, Ramon H (2015) Potencial for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy. **Biosystems Engineering** 91:393-402.
- Silva LL, da Costa RF, Campos JHB d. C, Dantas RT (2009) Influence of precipitations on agricultural productivity in Paraíba State. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 13:454–461.
- Silva-Fuzzo D, Praela-Pantano A, Camargo MBP (2015) Uso de dados do satélite trmm para testes de modelos agrometeorológicos de e estimativa de produtividade da cultura da soja. **Irriga** 20:490–501.
- Stackhouse JR., J Barnett, T. Bristow, W Chandler, J Hoell., D Westberg., T. Zhang M, Tisdale BT e BQ (2017) A revitalized GIS-enabled NASA POWER web site with featuring updated data parameters, expanded data accessibility, and analysis functionality for the renewable energy and other applications. **Am Sol Energy Soc Meet** 1:9-13.
- Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E (2009) AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal** 101:426-43.
- Tavares RLM, Oliveira SRM, Barros FMM, Farhate CVV, Souza ZM, La Scala Junior NL (2018) Previsão do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo em sistemas de manejo de cana-de-açúcar usando a abordagem Random Forest. **Scientia Agrícola** 74:281–287.
- Thorntwaite CW, Mather JR (1955) The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology. **Climatology** 8: 104.
- Toumi J, Er-raki S, Ezzahar J, Khabba S, Jarlan LC (2016) Avaliação do desempenho do modelo AquaCrop para estimativa da evapotranspiração, teor de água no solo e rendimento de grãos do trigo de inverno em Tensift Al Haouz (Marrocos): aplicação ao manejo da irrigação. **Agricultural Water Management** 163:219–235.
- Victorino EC, Carvalho LG, Ferreira DF (2016) Modelagem agrometeorológica para a previsão de produtividade de cafeeiros na região sul do estado de minas gerais. **Coffee Scienc** 11:211–220.
- Vieira ARR (2003) Influência do microclima de um sistema agroflorestal na cultura da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil). **Revista Brasileira de Agrometeorologia** 11:91–97.
- Wang L, Zhou X, Zhu X, Dong Z, Guo W (2016) Estimation of biomass in wheat using random forest regression algorithm and remote sensing data. **Crop Journal Elsevier** 4:212–219.
- Ward JH (1963) Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of America Statistical Association** 58:236-244.
- Wendling I, Brondani GE, Biassio AD, Leonardo F (2013) Vegetative propagation of adult *Ilex paraguariensis* St trees through epicormic shoots. **Acta Scientiarum Agronomy** 35:117-125.

Witten IH, Eibe F (2005) Data Mining: Pratical Machine Learning Tools and techniques, **Elsevier** 633p.

Woznicki SA, Baynes J, Panlasigui S, Mehaffey M, Neale A (2019) Development of a spatially complete floodplain map of the conterminous United States using random forest. **Science of the total environment** 647:942-953.

Zeron RMC, Serrano Junior CV (2016) Artificial intelligence in the diagnosis of cardiovascular disease. **Revista de Associação Médica Brasileira** 65:1438–1441.

Zhao Y, Justina DDD, Watanabe J, Rocha JV, Graziano P, Lamparelli RAC (2018) Multivariety sugarcane sucrose estimation using a combination of spectral and agrotechnology methods. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XX. 107830L. doi: 10.1117/12.2326705, 2018.