

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 03/05/2021.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

**MODELAGEM PARA AUXILIAR NA OTIMIZAÇÃO
DO SISTEMA “CLIMATE-SMART-AGRICULTURE”
PARA CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Victor Brunini Moreto

Engenheiro Agrônomo Ms. Agronomia (Produção Vegetal)

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

**MODELAGEM PARA AUXILIAR NA OTIMIZAÇÃO DO
SISTEMA “CLIMATE-SMART-AGRICULTURE” PARA
CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Discente: Victor Brunini Moreto

Orientador: Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim

**Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias –
Unesp, Campus de Jaboticabal,
como parte das exigências para
obtenção do título Doutor em
Agronomia (Produção Vegetal)**

M845m Moreto, Victor Brunini
Modelagem para auxiliar na otimização do sistema
"Climate-Smart-Agriculture" para cultivo de cana-de-açúcar :
modelagem para cana-de-açúcar / Victor Brunini Moreto. --
Jaboticabal, 2019
96 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Glauco de Souza Rolim

1. Agricultura Previsão. 2. Eficiência do uso da água. 3.
Computer software. 4. Agroindústria canavieira. I. Título.

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 TESE: MODELAGEM PARA AUXILIAR NA OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA "CLIMATE-SMART-
AGRICULTURE" PARA CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

AUTOR: VICTOR BRUNINI MORETO

ORIENTADOR: GLAUCO DE SOUZA ROLIM

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA
(PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:


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


Prof. Dr. JOSÉ RICARDO MACEDO PEZZOPANE
Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste-EMBRAPA / São Carlos/SP


Prof. Dr. JERRY ADRIANI JOHANN - Participação por videoconferência
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIOESTE / Cascavel/PR


Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 03 de maio de 2019

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Victor Brunini Moreto, nascido em 29 de abril de 1988 no município Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. Ingressou no curso de Engenharia Agrônômica na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FCAV-UNESP), Campus de Jaboticabal, em março de 2007. No mesmo campus, participou do Grupo integração Empresa Universidade (GIEU) durante a gestão 2009-2010. Foi bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), na modalidade de iniciação científica de 2010 a 2011. Em novembro de 2012 obteve o título de Engenheiro Agrônomo. Logo após iniciou o curso de mestrado no Campus de Jaboticabal, onde no final de 2014 obteve o título de mestre em Agronomia (Produção Vegetal). Em agosto de 2015 ingressou no programa de doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) do Campus de Jaboticabal, onde aproximadamente quatro anos depois, defende sua tese para obtenção do título de doutor em Agronomia (Produção Vegetal). Durante o período de doutoramento desenvolveu a pesquisa em parceria com a Universidade Católica de Leuven na Bélgica, onde residiu entre setembro de 2017 a agosto de 2018 como bolsista da fundação de Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES). Ao longo de sua trajetória acadêmica seguiu as linhas de pesquisa em agrometeorologia e modelagem de cultivos agrícolas; formou parcerias com empresas privadas e órgãos públicos para o desenvolvimento de trabalhos com objetivo de atender necessidades da sociedade na busca de novas tecnologias para agricultura e o agronegócio brasileiro.

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

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais	1
1.1. O modelo AquaCrop da FAO	3
1.2. REFERÊNCIAS	5
CAPÍTULO 2 - Suporte à gestão do canavial com uso de previsões de precipitação do modelo Eta	8
2.1. INTRODUÇÃO	9
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	11
2.2.1. Área de estudo e observações meteorológicas	11
2.2.2. O modelo Eta	11
2.2.3. Avaliação das previsões do modelo Eta	13
2.2.4. Limiares de Precipitação	16
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
2.3.1. Limiar $PREC > 0$ mm	20
2.3.2. Outros Limiares	23
2.3.3. ORSS - probabilidade de o desempenho não ser ao acaso	24
2.4. CONCLUSÕES	26
2.5. REFERÊNCIAS	26
CAPÍTULO 3 – Modelo AquaCrop: parametrização e conversão de biomassa para o cultivo de cana de açúcar.	30
3.1. INTRODUÇÃO	31
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	33
3.2.1. Área de estudo e dados observados	33
3.2.2. Cálculo de biomassa do modelo AquaCrop	36
3.2.3. Parametrização do modelo AquaCrop	37
3.2.4. Adaptação do cálculo de biomassa do AquaCrop para cana	38
3.2.5. Avaliação do desempenho do modelo	38
3.3. RESULTADOS	40
3.3.1. Parametrização	40
3.3.2. Coeficientes de conversão de biomassa	40
3.3.3. Calibração	42
3.3.4. Validação	43
3.3.5. Resposta das simulações às estações úmidas e secas	45
3.4. DISCUSSÃO	47
3.4.1. Coeficientes de crescimento e declínio (CGC e CDC, respectivamente)	47
3.4.2. Coeficiente de estresse para expansão do dossel ($K_{s_{exp}}$)	47
3.4.3. Transpiração do cultivo	48

3.4.4. Coeficientes de conversão de biomassa	48
3.4.5. Calibração	49
3.4.6. Validação	50
3.5. CONCLUSÕES	52
3.6. REFERÊNCIAS	53
CAPÍTULO 4 - Modelo AquaCrop: influência de estresses hídricos e térmicos no acúmulo de sacarose	60
4.1. INTRODUÇÃO	61
4.2. DADOS E MÉTODOS	63
4.2.1. Área de estudo e dados observados	63
4.2.2. Partição de biomassa em sacarose pelo índice de colheita	66
4.2.3. Determinação de fatores influentes no acúmulo de sacarose	68
4.2.4. Ajuste do HI_0 sob influência do estresse hídrico	69
4.2.5. Método dos graus-dias negativos (NDD)	69
4.2.6. Ajuste do HI_0 sob influência do estresse térmico	70
4.2.7. Avaliação de desempenho das simulações	71
4.3. RESULTADOS	72
4.3.1. Análise de componentes principais e regressões lineares múltiplas	72
4.3.2. Ajustes dos estresses térmicos e hídricos no índice de colheita	74
4.3.3. Desempenho das simulações para acúmulo de sacarose e ATR	76
4.4. DISCUSSÃO	79
4.4.1. Efeitos estresse hídrico e térmico no acúmulo de sacarose	79
4.4.2. Desempenho das simulações do acúmulo de sacarose	80
4.5. CONCLUSÕES	83
4.6. REFERÊNCIAS	84

MODELAGEM PARA AUXILIAR NA OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA “CLIMATE-SMART-AGRICULTURE” PARA CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO: A agricultura no mundo caminha em alta velocidade para a próxima revolução verde, a chamada revolução da agricultura digital, que combina outras grandes áreas que revolucionaram a agricultura, como as técnicas de biotecnologia e agricultura de precisão. Estas técnicas foram essenciais para aumento da produtividade agrícola no mundo. Em adição, a agricultura digital pode otimizar ainda mais a associação dos dados climáticos no planejamento de safras e no manejo de cultivos agrícolas. O conceito “Climate-Smart-Agriculture” (CSA) está inserido no universo da agricultura digital como uma linha promissora e necessária para o futuro sustentável da agricultura. Este trabalho apresenta técnicas para auxiliar na adoção de estratégias CSA para áreas produtoras de cana-de-açúcar, como (i) verificação da acurácia do modelo de previsão de tempo Eta (INPE) para áreas de cultivo de cana-de-açúcar no Brasil, visando auxiliar na tomada de decisão de operações no campo; (ii) parametrização do modelo AquaCrop-FAO para estimação de produtividade e qualidade da produção, colaborando com planejamento e sustentabilidade do setor; (iii) proposta de modificação nos cálculos do modelo AquaCrop-FAO para estimar concentração de sacarose. As técnicas propostas neste trabalho mostraram-se eficientes e promissoras para aplicação prática. Foi possível avaliar e identificar a acurácia do modelo de predição de tempo (Eta) das áreas canavieiras, com previsões confiáveis até quatro dias e probabilidade de acerto na detecção de chuvas de 70%. O uso do modelo AquaCrop apresentou acurácia nas estimações de biomassa na calibração e validação, com MAPE de, 7,65% e 13,45%, respectivamente. Para sacarose, as estimações do modelo apresentaram valores de MAPE menores do que 5,0% na calibração e validação.

Palavras-Chave: agricultura digital, modelo de cultivos agrícolas, *Sacharum ssp.*, condições climáticas, AquaCrop-FAO, previsão de precipitação.

MODELS TO AUXILIATE THE OPTIMIZATION OF "CLIMATE-SMART-AGRICULTURE" SYSTEM FOR SUGARCANE CULTIVATION

ABSTRACT: Agriculture in the world is moving at a rapid pace to the next green revolution, the so-called digital agriculture revolution, which combines other major areas that have revolutionized agriculture, such as biotechnology and precision agriculture. These techniques were essential for increasing agricultural productivity in the world. Digital agriculture can now further optimize the association of climatic data in crop planning and crop management. The concept "Climate-Smart-Agriculture" (CSA) is inserted in the digital agriculture universe as a promising and necessary line for the sustainable future of agriculture. This paper presents techniques to assist in the adoption of CSA strategies for sugarcane producing areas, such as (i) verification of the accuracy of the Eta (INPE) weather forecast model for important sugarcane producing areas in Brazil, aiming at assisting in the decision making of operations in the field; (ii) parameterization of the AquaCrop-FAO model for the estimation of productivity and quality of production, collaborating with planning and sustainability of the sector; (iii) proposal for modification in the calculations of the AquaCrop-FAO model to estimate sucrose concentration. The techniques proposed in this work prove to be efficient and promising for practical application. It was possible to evaluate and to identify the accuracy of the time prediction model (Eta) of the sugarcane areas, with reliable predictions up to four days and probability of detection of rainfall of 70%. The use of the AquaCrop model presented accuracy in the estimations of biomass in the calibration and validation, with MAPE of, 7.65% and 13.45%, respectively. For the sucrose estimation the MAPE values were lower than 5.0% in the calibration and validation of the model.

KEY-WRODS: digital agriculture, crop models, *Sacharum* ssp, weather conditions, AquaCrop-FAO, precipitation forecasts.

CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais

A agricultura é umas das atividades humanas mais sensíveis ao clima onde variações nas temperaturas e no regime de precipitação pluvial impactam em todas as etapas da produção. Compra de insumos, plantio, operações no campo, irrigação, adubação, colheita e o planejamento econômico de safras, são exemplos de atividades da cadeia agrícola que são diretamente dependentes dos fatores climáticos e do ambiente (Ackerman e Santon, 2013).

O aumento populacional e a demanda por alimentos incentivam cada vez mais a busca dos pesquisadores, dos profissionais da área e de investidores, no entendimento das relações entre o clima e a produção agrícola. Nesse âmbito surgem novos conceitos e tecnologias para ajudar na busca do melhor atendimento das interações climáticas, agronômicas, econômicas e de sustentabilidade para o agronegócio.

A agricultura digital ou “*smart farming*” (agricultura inteligente – tradução livre) é combinação de ciência de dados e a agricultura para relacionar grande quantidade de dados e informações pertinentes na gestão antecipada e automatizada das atividades agrícolas (Prototop e Shanoyan, 2016; Bertschi, 2018).

Associado ao conceito de agricultura digital está a abordagem “*Climate-Smart Agriculture (CSA)*” (agricultura inteligente adequada ao clima – tradução livre). CSA baseia-se em integrar estratégias para melhorar o planejamento, adaptação e manejo da atividade agrícola, trabalhando com três objetivos simultâneos: (i) aumentar a produtividade e renda de forma sustentável, (ii) aumentar a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, e (iii) reduzir as emissões de gases do efeito estufa (Rao, 2018; FAO, 2019).

A maneira mais conhecida para aplicação de estratégias CSA é pelo uso de modelos de cultivos (“*crop models*”). Modelo por definição é uma representação de um sistema. Os modelos podem ser (i) matemáticos, quando o sistema é descrito por meio de equações, (ii) empíricos ou estatísticos, quando descrevem correlações entre variáveis sem necessariamente se referir ao processo modelado, e (iii) mecanísticos ou explicativos, que expressam as relações de causa e efeito entre as variáveis (Dourado Neto et al., 1998).

Os modelos de cultivos são importantes ferramentas para simular o crescimento e desenvolvimento das plantas. Na atualidade a modelagem de cultivos é uma ferramenta poderosa, considerada como a melhor forma de transferir o conhecimento da pesquisa para o produtor ou profissional da área (Zhao et al., 2019; Sihag e Prakash, 2019).

As técnicas de modelagem de cultivos podem simular as interações do sistema solo-planta-atmosfera, avaliar o impacto das mudanças climáticas e realizar a previsão da produção de safras agrícolas. O uso de modelos de previsão de safras pode melhorar a qualidade da produção, aumentar a produtividade, minimizar a incidência de pragas e o custo de produção (Avadhani et al., 2019; Sihag e Prakash, 2019).

São diversos os exemplos de modelos de estimação e/ou previsão de safras agrícolas. Dentre os mais conhecidos encontram-se os modelos mecanísticos: DSSAT - *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (Jones et al., 2003), o modelo AQUACROP-FAO, que relaciona a produtividade da água e a produtividade agrícola (Steduto et al., 2009) e o APSIM – *Agricultural Production System siMulator* (McCown et al., 1996). Estes modelos mecanísticos fazem a representação das relações do sistema solo-planta-atmosfera para vários cultivos agrícolas, e permitem que o usuário adapte seus parâmetros de acordo com sua necessidade.

Em relação ao cultivo da cana-de-açúcar, o DSSAT-Canegro e o APSIM-Sugarcane são os mais usados. A maior dificuldade no uso de modelos de cultivos está no elevado número de parâmetros de entrada, normalmente trabalhosos e difíceis de serem mensurados no campo (Marin et al., 2011; Pagani et al., 2017; Carvalho et al., 2018; Dias e Sentelhas 2018).

O modelo AquaCrop, muito usado pela sua simplicidade, tem foco principal para cultivos anuais, como milho, trigo e soja. A calibração do modelo para o cultivo da cana-de-açúcar é recente, com poucos trabalhos usando o AquaCrop para previsão de safras de cana-de-açúcar no mundo (Bello et al., 2013; Bahmani e Eghbalian, 2018) e no Brasil (Alencar, 2014).

O cultivo da cana-de-açúcar é de importância mundial, seja para produção de açúcar ou ainda com mais peso no mercado atual para a indústria de

biocombustíveis. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e o segundo maior produtor de bioetanol, com a maior frota de carros de combustível flex (Souza et al., 2015; Oliveira et al., 2019).

A elevada demanda dos produtos derivados do cultivo da cana-de-açúcar estabelece uma necessidade para o setor sucroalcooleiro em acompanhar os novos aspectos da agricultura. De acordo com o Fórum de Economia Mundial - *World Economic Forum* (2016) a agricultura digital e o sistema CSA são potencialmente os maiores aceleradores de tecnologias de produção agrícola. Esta fusão da ciência de dados e agricultura poderá ajudar produtores, pesquisadores e profissionais do setor, a tomar decisões baseadas na otimização da produtividade, aumento da receita e minimização de custos (Rosenzweig et al., 2013; Capalbo et al., 2017, Antle et al., 2017; Rao, 2018).

Este estudo busca apresentar técnicas para abordagem CSA com foco em áreas de cultivo da cana-de-açúcar. Nos próximos capítulos serão apresentadas ferramentas de suporte para auxílio na gestão do setor canavieiro, com os objetivos de: (i) avaliar a qualidade das previsões de precipitação feitas pelo modelo Eta em regiões produtoras de cana-de-açúcar; (ii) parametrizar o modelo AquaCrop-FAO para estimação de biomassa (t ha^{-1}), teor de sacarose (t ha^{-1}) e açúcar total recuperável (ATR, $\text{kg t}^{-1} \text{ha}^{-1}$).

4.5. CONCLUSÕES

Neste estudo foi proposto um novo método para o cálculo do índice de colheita no modelo AquaCrop. A metodologia adiciona a influência das variações na temperatura do ar e da disponibilidade hídrica, definindo intensidade e efeito dos estresses durante o período de formação da produção (*yield formation*).

O uso do modelo AquaCrop associado ao novo método pode contribuir para próximos estudos e melhor entendimento das relações hídricas e térmicas da planta de cana de açúcar e o ambiente.

A adição do método ao modelo AquaCrop apresentou potencial e foi acurado nas estimações de ATR da cana de açúcar em regiões produtoras do estado de São Paulo, contribuindo para a usabilidade do modelo, que vai em concordância com os termos práticos de expressão de qualidade da cana de açúcar.

A precisão na validação foi ligeiramente baixa ($R^2 = 0.42$), mesmo com a calibração precisa ($R^2 = 0.70$). Há necessidade de mais dados para melhorar a precisão dos resultados. No entanto, em relação a acurácia geral as etapas de calibração e validação se mostraram eficazes, com erro percentual absoluto médio menor que 5% ($\pm 4 \text{ kg ton}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) e raiz do erro quadrático médio menor que 10%.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Fundação de Coordenação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento deste projeto e o apoio do departamento de Ciências Ambientais e do Solo da Universidade de Leuven, em especial a colaboração da Dra. Eline Vanuytrecht e Dr. Dirk Raes no desenvolvimento deste trabalho.

4.6. REFERÊNCIAS

Adeboye, O. B. et al. Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max* L. merr) in Ile-Ife, Nigeria. *Agricultural Water Management*, 213(1):1130-1146, 2019.

Allen, R.G., L.S.Pereira, D. Raes, and M. Smith. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.

Araújo, R. et al., Variation in the sugar yield in response to drying-off of sugarcane before harvest and the occurrence of low air temperatures. *Bragantia*, Campinas v. 75, n. 1, p.118-127, 2016.

Bahmani, O., Eghbalian, S. Simulating the Response of Sugarcane Production to Water Deficit Irrigation Using the AquaCrop Model. *Agric Res*, 7(2):158–166. 2018, <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0311-0>.

Bello, CAC 2013. Uso del modelo Aquacrop para estimar rendimientos para el cultivo de caña de azúcar en el departamento del valle del Cauca. Report of Proyecto de Cooperación técnica TCP/COL/3302. FAO & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. 66p. ISBN I3427S/1/08.13.

Cardozo, N.P. e Sentelhas, P.C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. *Sci. Agric.* v.70, n.6, p.449-456, 2013.

Cardozo, N.P. et al. Modeling sugarcane ripening as a function of accumulated rainfall in Southern Brazil. *Int J Biometeorol*, 2015.

Cardozo, N.P. Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis meteorológicas. (DISSERTAÇÃO). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

Castro, O. M., Viera, S. R., Siqueira, G. M., Andrade, C.A. Physical and chemical attributes of a rhodic hapludox under different tillage systems. *Bragantia*, Campinas, v.68, n.4, p. 1047-1057, 2009.

Costa, C. T. S.; Ferreira, V. M.; Endres, L.; Ferreira, D. T. R. G.; Gonçalves, E. R. Crescimento e produtividade de quatro variedades de cana-de-açúcar no quarto ciclo de cultivo. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 24, n. 3, p. 56-63, 2011.

Dantas Neto, J.; Figueredo, J. L. da C.; Farias, C. H. de A.; Azevedo, H. M. de; Azevedo, C. A. V. de. Resposta da cana-de-açúcar, na primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.283-288, 2006.

Emdad, M.R., Tafteh, A., Ghalebi, S. Validation of AquaCrop model for simulating wheat yield in different irrigation events, *Journal of Water and Soil*, 32(3):463-473, 2018.

FAO, AquaCrop reference manual for version v.6: Chapter3. Calculation Procedures, by Dirk Raes, Pasquale Steduto, Theodore C. Hsiao, and Elias Ferres with the contribution of the AquaCrop Network, Rome, 2017.

Fernandes, A.C. *Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar*. Piracicaba: STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos, 193 p. 2000.

Ferreira, T. H. S., Tsunada, M. S., Bassi, D., Araújo, P., Matiello, L., Guidelli, G. V., Righetto, G. L., Gonçalves, V. R., Lakshmanan, P., Menossi, M. Sugarcane Water Stress Tolerance Mechanisms and Its Implications on Developing Biotechnology Solutions. *Frontiers in Plant Science*. v. 8, n. 1077. doi: 10.3389/fpls.2017.01077, 2017.

Hay, R.K.M. Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology, *Annals of Applied Biology*, 126(1):197-216, 1995.

IAC, Instituto Agrônomo de Campinas, 2017. <http://www.iac.sp.gov.br/>

Inman-Bamber, N., Smith, D. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Res.* 92, 185–202, 2005. doi: 10.1016/j.fcr.2005.01.023

Inman-Bamber, N.G. et al. Sugarcane for water-limited environments: Enhanced capability of the APSIM sugarcane model for assessing traits for transpiration efficiency and root water supply, *Field Crops Research*, 196(1):112-123, 2016.

Jin, X., Yang, G., Li, Z. et al. Estimation of water productivity in winter wheat using the AquaCrop model with field hyperspectral data. *Precision Agric*, 19:1, <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9469-2>. 2018.

Jones, M. R. e Singels, A. Refining the Canegro model for improved simulation of climate change impacts on sugarcane, *European Journal of Agronomy*, 100(1):76-86, 2018.

Keating, B.A., Robertson, M.J., Muchow, R.C., Huth, N.I. Modelling sugarcane production systems. 1. Development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Res.*, 61, pp. 253-271, 1999.

Kumar, V., Chandra, R., Jain, S.K. Performance Evaluation of AquaCrop Model for Rabi Maize Crop in the North Bihar Condition. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(5): 973-979, 2018.

Liu, D.L. e Bull, T.A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. *Ecological Modelling*, 144(2-3):181-211, 2001.

Machado, R. S., et al. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.44, n.12, p. 1575-1582, 2009.

Marcari, M.A., Rolim, G.S., Aparecido, L.E.O. Agrometeorological models for forecasting yield and quality of sugarcane, *Australian Journal of Crop Science*, 9(11):1049-1056, 2015.

Montanari, R., Marques Junior, J., Campos, M. C. C., Souza, Z. M., Camargo, L. A. Mineralogical characterization of Oxisol in different relief form in the region of Jaboticabal, SP, *Rev. Ciênc. Agron.*, v. 41, n. 2, p. 191-199, 2010.

Muluneh et al., Adapting to climate change for food security in the Rift Valley dry lands of Ethiopia: supplemental irrigation, plant density and sowing date. *The Journal of Agricultural Science*, 155(5):703-724, 2017.

O'Leary, G.J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield, *Field Crops Research*, 68(1), 97-111, 2000.

Pagani V. et al. Forecasting sugarcane yields using agro-climatic indicators and Canegro model: A case study in the main production region in Brazil. *Agricultural Systems*, 154, 45-52, 2017.

Pereira, L.F.M. et al. Sugars levels of four sugarcane genotypes in different stem portions during the maturation phase. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 89(2):1231-1242, 2017.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2009. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: ii. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal* 101, 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>.

Saxton, K.E., Rawls, W.J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society America Journal* 1569–1578, 2006.

Saxton, K.E., Willey, P.H., The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. In: Singh, V.P. & Frevert, D.K., eds. *Watershed models*. Boca Raton, CRC Press, p.401-435, 2009.

Scarpari, M.S. e Beauclair, E.G.F. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, v.61, n.5, p.486-491, 2004.

Scarpari, M.S. e Beauclair, E.G.F. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane, *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, v.66, n.5, p.622-628, 2009.

Scarpari, M.S. Modelos para previsão da produtividade de cana-de-açúcar (*Sacharum spp.*) através de parâmetros climáticos. (TESE), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

Schoffel, E.R. e Volpe, C.A. Relação entre a soma térmica efetiva e o crescimento da soja. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 89-96, 2002.

Shrivastava, A.K., Solomon, S., Rai, R.K. et al. Physiological Interventions for Enhancing Sugarcane and Sugar Productivity. *Sugar Tech*, 17:215, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12355-014-0321-6>

Silva, R.F.S. e Segato, S.V. Importance of the use of maturity, plant in the culture of sugarcane. *Nucleus*, 8(2), 2011.

Singels, A. e Benzuidenhout, C.N. A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model, *Field Crops Research*, 78(2-3):151-164, 2002.

Souza, J.L. et al. Adjustment of water-crop production models for ratoon sugarcane. *Pesq. Agropec. Trop.*, Goiânia, v. 45, n. 4, p. 426-433, 2015.

Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437, 2009.

Toppa, E.V.B. et al. Physiology aspects of sugarcane production. *Pesqui Apl Agrotec* 3:223-230, 2010.

Tsakmakis, I.D. et al. Evaluation of AquaCrop model simulations of cotton growth under deficit irrigation with an emphasis on root growth and water extraction patterns, *Agricultura Water Management*, 213(1):419-432, 2019.

Uehara N., Sasaki, H., Aoki, N., Ohsugi, R. Effects of the Temperature Lowered in the Daytime and Night-time on Sugar Accumulation in Sugarcane, *Plant Production Science*, 12(4):420-427, DOI: 10.1626/pps.12.420, 2009.

Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Heng, L.K., Garcia Vila, M., Mejias Moreno, P. AquaCrop: FAO'S crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling & Software* 62, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>, 2014.

Verma, I. et al. Expression analysis of genes associated with sucrose accumulation and its effect on source–sink relationship in high sucrose accumulating early maturing sugarcane variety, *Physiol Mol Biol Plants*, 25(1):207–220, 2019.

Watt, D. A., McCormick, A. J., & Cramer, M. D. Source and sink physiology. In P. H. Moore, & F. C. Botha (Eds.), *Sugarcane: physiology, biochemistry and functional biology* (p. 483-520). Oxford: Willey Blackwell. 2014.

Xu, J., et al. Modeling rice development and field water balance using AquaCrop model under drying-wetting cycle condition in eastern China, *Agricultura Water Management*, 213(1):289-297, 2019.

Zhao, Y., et al. Multivariety sugarcane sucrose estimation using a combination of spectral and agrotechnology methods. *Proc. SPIE 10783, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XX*, 107830L. doi: 10.1117/12.2326705, 2018.

Zu, Q., et al. Spatio-temporal distribution of sugarcane potential yields and yield gaps in Southern China. *European Journal of Agronomy*, 92(1):72-83, 2018.