



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

EVANDRO JOÃO RODRIGUES

**SIMULAÇÃO DO IMPACTO DO DÉFICIT HÍDRICO SOBRE A
PRODUTIVIDADE NO MILHO DE SEGUNDA SAFRA NO
PARANÁ**

Londrina
2023

EVANDRO JOÃO RODRIGUES

**SIMULAÇÃO DO IMPACTO DO DÉFICIT HÍDRICO SOBRE A
PRODUTIVIDADE NO MILHO DE SEGUNDA SAFRA NO
PARANÁ**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Augusto de Aguiar e Silva

Co-orientador: Dr. Daniel Soares Alves

Londrina
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Rodrigues, Evandro João.

SIMULAÇÃO DO IMPACTO DO DÉFICIT HÍDRICO SOBRE A PRODUTIVIDADE NO MILHO DE SEGUNDA SAFRA NO PARANÁ / Evandro João Rodrigues. - Londrina, 2023.
88 f. : il.

Orientador: Marcelo Augusto de Aguiar e Silva.

Coorientador: Daniel Soares Alves.

Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2023.

Inclui bibliografia.

1. Modelagem da cultura do milho - Tese. 2. Agrometeorologia - Tese. 3. DSSAT - Tese. 4. Previsão de produtividade de safras - Tese. I. de Aguiar e Silva, Marcelo Augusto. II. Alves, Daniel Soares. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU 63

EVANDRO JOÃO RODRIGUES

**SIMULAÇÃO DO IMPACTO DO DÉFICIT HÍDRICO SOBRE A
PRODUTIVIDADE NO MILHO DE SEGUNDA SAFRA NO
PARANÁ**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Augusto de Aguiar e Silva
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Dra Geovanna Cristina Zaro
University of Guelph

Dra. Heverly Moraes
IDR – Paraná

Dr. Nilson Vieira Junior
Wageningen University & Research

Dr. Paulo Henrique Caramori
IDR – Paraná

Londrina, 28 de Agosto de 2023.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois com muita fé e acreditando nos meus sonhos consegui chegar até aqui, sempre com Deus à frente, os caminhos foram se abrindo e se concretizando.

Ao Prof. Dr. Marcelo Augusto de Aguiar e Silva, meu orientador que com seu companheirismo e atenção me mostrou todos caminhos a serem tomados para que minhas atitudes fossem sempre assertivas durante esta caminhada.

Ao Prof. Dr. Daniel Soares Alves, meu co-orientador pela dedicação e tempo aplicado a mim, me ajudando muito na execução desta tese, me acompanhando nas tarefas de campo, operações técnicas e também na execução da modelagem.

Ao Prof. Dr. Paulo Henrique Caramori, meu orientador de mestrado, que sempre me apoiou, me encaminhando e incentivando à realizar minha carreira acadêmica.

A todos professores do Doutorado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, que contribuíram imensamente para meu ganho de conhecimento, que carregarei estes ensinamentos por toda vida.

Aos estudantes de Agronomia da Unifil, Henrique Hiroki Yamada, Felipe Ossamu Haida e Gabriel Felipe Palodeto Sato, que me auxiliaram nas atividades dos ensaios de campo, obrigado pelo companheirismo, amizade e comprometimento que tiveram comigo.

Ao Dr. Nilson Vieira Junior e ao Me. Elizeu David dos Santos, por todo companheirismo e ajuda prestada, sempre prestativos me auxiliando quando tinha alguma situação para resolver.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior – Capes pela concessão da bolsa de estudos.

Ao IDR – Paraná por toda a estrutura oferecida, e pela equipe de pesquisadores que não pouparam esforços para ajudar na realização do estudo.

Ao Centro Universitário Filadélfia – UNIFIL, pelo fornecimento da área experimental, e por toda estrutura disponibilizada para realizar as tarefas

experimentais.

À minha esposa, Karina Lemos dos Santos pelo apoio durante os estudos, sempre me encorajando e me aconselhando em todos os momentos.

À minha filha, Mariana dos Santos Rodrigues que nasceu no decorrer do curso, que me serviu de inspiração e motivação para prosseguir nesta caminhada.

Aos meus pais, Emanuel de Oliveira Rodrigues e Neuza Maria Rodrigues que sempre acreditaram no meu potencial, meu muito obrigado pela educação que me deram, me encorajando a sempre acreditar em meus sonhos.

Ao meu avô, José de Oliveira Rodrigues (*in memoriam*), que foi morar com Deus no decorrer desta caminhada, serei sempre muito grato pelo seu companheirismo, pela admiração que tinha por mim e por sempre acreditar em mim.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade de participar e pelas contribuições e sugestões na tese.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”. (Albert Einstein)

RESUMO

RODRIGUES, Evandro João. **SIMULAÇÃO DO IMPACTO DO DÉFICIT HÍDRICO SOBRE A PRODUTIVIDADE DO MILHO DE SEGUNDA SAFRA NO PARANÁ.** 2023. 88 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023.

A previsão de safras é fundamental para o planejamento agrícola. Entre as atividades agrícolas, o milho segunda safra é o cereal mais produzido no Estado do Paraná, sendo a macrorregião do Terceiro Planalto Paranaense a mais cultivada. Porém este período de cultivo possui considerável risco de ocorrência de déficit hídrico. Para conhecimento do comportamento dos híbridos de milho perante condições de estresses ou condições ótimas de disponibilidade hídrica, o modelo CERES-maize pode ser usado para simular e estimar o desempenho produtivo e fenológico em diferentes locais e condições climáticas para as quais foi calibrado. O objetivo do trabalho foi avaliar a eficiência do modelo CERES-maize para o híbrido de milho Status nos sistemas irrigado e sequeiro em municípios que compõe o Terceiro Planalto Paranaense. Os experimentos de campo foram realizados em 2019 e 2020 na Estação Experimental do Centro Universitário Filadélfia – Unifil, Campus Palhano em Londrina (coordenadas). Com os resultados foi calibrado e validado o modelo CERES-maize da plataforma DSSAT. Foi testada a eficiência do modelo para outros três municípios do Terceiro Planalto Paranaense: Cambará, Campo Mourão e Santa Tereza do Oeste. Posteriormente, foram simuladas irrigações nestes municípios para quantificar a perda de produtividade e identificar as regiões com maior potencial de uso de irrigação. Realizou-se análises de percentual do RMSE, viés, r^2 , índice “d” de concordância e teste t de Student. Em Londrina em 2019 a produtividade média observada, irrigado e sequeiro, foi de 6.828 e 5.238 kg ha⁻¹, respectivamente, e simulada de 8.112 e 6.992 kg ha⁻¹, respectivamente. Em 2020 a produtividade observada, irrigado e sequeiro, foi de 8.170 e 2.667 kg ha⁻¹, respectivamente e simulada de 6.747 e 1.875 kg ha⁻¹, respectivamente. A análise de RMSE foi 25,78%, considerada simulação aceitável, viés de -2,90%, índice de concordância “d”, de 0,90 e r^2 moderado de 0,68. Os outros três municípios foi observado/simulado, Cambará 5.691 e 3.151 kg ha⁻¹, Campo Mourão 6.471 e 5.521 kg ha⁻¹ e Santa Tereza do Oeste 8.316 e 6.969 kg ha⁻¹, respectivamente. Observou-se que o valor de RMSE foi 27,03%, sendo válido em uma simulação, valor de viés de -24,30%, valor de correlação de 0,89 sendo considerada fortemente positiva e índice “d” 0,86, demonstrando boa concordância. Ao simular a irrigação, Londrina apresentou maior perda de produtividade causada pelo déficit hídrico com 75% de perda, seguido por Cambará com 58%, Campo Mourão 11% e Santa Tereza do Oeste 4%. O modelo é uma ferramenta eficiente para previsão de produtividade e fenologia do milho em sistemas irrigado e sequeiro no local que foi validado e em outras localidades semelhantes.

Palavras-chave: CERES-maize, DSSAT, Modelagem, Irrigação, Safrinha, Zea mays.

ABSTRACT

RODRIGUES, Evandro João. **SIMULATION OF THE IMPACT OF WATER DEFICIT ON THE PRODUCTIVITY OF CORN SECOND SEASON IN PARANÁ STATE, BRAZIL.** 2023. 88 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023.

Harvest forecast is essential for agricultural planning. Among agricultural activities, second season corn is the most produced cereal in the State of Paraná, with the macro-region of the Third Plateau of Paraná being the most cultivated. However, cultivation in this season presents considerable risk of water deficit. To understand the behavior of corn hybrids under stress or optimal conditions of water availability, the CERES-maize model can be used to carry out simulations and estimates of productive and phenological performance in different locations and climatic conditions for which it was calibrated. The objective of this work was to evaluate the efficiency of the CERES-maize model for the Status corn hybrid in irrigated and rainfed systems in municipalities located in the Third Plateau of Paraná. The field experiments were carried out in 2019 and 2020 at the Experimental Station of the Philadelphia University Center – Unifil, Campus Palhano in Londrina (coordinates). With the results, the CERES-maize model of the DSSAT platform was calibrated and validated. The efficiency of the model was tested for three other municipalities in the Third Plateau of Paraná: Cambará, Campo Mourão and Santa Tereza do Oeste. Subsequently, irrigations were simulated in these municipalities to quantify the loss of productivity and identify the regions with the greatest potential for irrigation use. Analysis of the RMSE percentage, bias, r^2 , agreement “d” index and Student’s t test were carried out. In Londrina in 2019, the observed average productivity for irrigated and rainfed was 6,828 and 5,238 kg ha⁻¹, respectively, and the simulated productivity was 8,112 and 6,992 kg ha⁻¹, respectively. In 2020, the observed productivity for irrigated and rainfed was 8,170 and 2,667 kg ha⁻¹, respectively, and simulated productivity was 6,747 and 1,875 kg ha⁻¹, respectively. The RMSE analysis was 25.78%, considered acceptable simulation, bias of -2.90%, agreement index “d” of 0.90 and moderate r^2 of 0.68. The observed/simulated productivities for other three municipalities were: Cambará 5,691 and 3,151 kg ha⁻¹, Campo Mourão 6,471 and 5,521 kg ha⁻¹ and Santa Tereza do Oeste 8,316 and 6,969 kg ha⁻¹, respectively. It was observed that the RMSE value was 27.03%, considered valid in a simulation, bias value of -24.30%, correlation value of 0.89 considered strongly positive and “d” index 0.86, demonstrating good agreement. When simulating irrigation, Londrina showed the greatest loss of productivity caused by water deficit with 75% loss, followed by Cambará with 58%, Campo Mourão 11% and Santa Tereza do Oeste 4%. The model is an efficient tool for predicting corn productivity and phenology in irrigated and rainfed systems at the site that was validated and in similar locations.

Keywords: CERES-maize, DSSAT, Modeling, Irrigation, Safrinha, *Zea mays*.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA..... | 12 |
| 2.1 IMPORTÂNCIA, EVOLUÇÃO E PERSPECTIVAS DA CULTURA DO MILHO NO BRASIL..... | 12 |
| 2.2 IMPACTO DAS CONDIÇÕES HÍDRICAS NO RENDIMENTO DO MILHO..... | 14 |
| 2.3 FISIOLOGIA DO MILHO EM RELAÇÃO AO ESTRESSE HÍDRICO | 16 |
| 2.4 A MODELAGEM | 20 |
| 2.5 ORIGEM E TIPOS DE MODELAGEM..... | 21 |
| 2.6 MODELO CERES-MAIZE APLICADO À CULTURA DO MILHO..... | 26 |
| 3 REFERÊNCIAS..... | 33 |
| | |
| 4 ARTIGO A – CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO CERES-MAIZE PARA O MILHO SEGUNDA SAFRA EM REGIME SEQUEIRO E IRRIGADO EM LONDRINA, PR, BRASIL | 42 |
| | |
| 5 ARTIGO B – USO DO MODELO CERES-MAIZE PARA SIMULAR PRODUTIVIDADE E FENOLOGIA DO MILHO SEGUNDA SAFRA, SEQUEIRO E IRRIGADO, NO TERCEIRO PLANALTO DO ESTADO DO PARANÁ | 66 |
| | |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 88 |

1 INTRODUÇÃO

O milho possui grande importância nacional e internacional, pois é uma cultura com amplo poder produtivo e de finalidades de uso, como a alimentação humana, alimentação animal através de silagens da sua parte aérea ou rações, e fins industriais com diversos subprodutos.

A segunda safra possui maior área plantada no país, compreendendo o período de outono e o inverno, quando ocorrem maiores riscos de déficit hídrico. A fase crítica da disponibilidade hídrica para a cultura é o florescimento, período que abrange as fases de embonecamento e polinização. O déficit hídrico nessas fases provoca baixa polinização e baixa granação de espigas, o que acarreta em drástica queda de produtividade.

Embora a fase de florescimento se destaque como crítica, o desenvolvimento vegetativo e o enchimento de grãos são muito importantes. No desenvolvimento vegetativo a planta define o seu potencial produtivo e é também quando desenvolve seu sistema radicular, o qual irá assegurar que a planta passe por momentos de estiagem com suprimento hídrico das camadas mais profundas do solo, garantindo boa formação de grãos nas fases mais avançadas da cultura.

Com isso é necessário ter o máximo de conhecimento da relação do híbrido cultivado com as condições do ambiente que está sendo implantado. Híbridos de milho são bastantes distintos quanto a ciclo, potencial produtivo e resposta produtiva quando passam por déficit hídrico.

Na busca por modelos que consideram os fatores de solo e clima e um comportamento muito geral de fenologia, surge-se a necessidade de analisar também o desempenho individual de determinada cultivar ou híbrido. O, CERES-maize é um modelo ecofisiológico dinâmico determinístico, que cria simulações mais detalhadas, baseadas em processos físicos e fisiológicos do crescimento vegetal, que abre a perspectiva de gerar informações mais seguras sobre as respostas das culturas ao ambiente. A hipótese que se assume é de que este modelo é capaz de simular o crescimento, desenvolvimento e produtividade do milho, considerando os efeitos genéticos da cultivar, do tempo, tipo de solo e déficit hídrico, em condições de sequeiro e irrigado, e em regiões distintas das que foi calibrado.

Os objetivos do trabalho foram calibrar e validar o modelo CERES-maize para o híbrido de milho status nos sistemas irrigado e sequeiro em duas

safras em Londrina, posteriormente validar em condições de seca em outros três municípios que compõem o terceiro planalto paranaense, e simular estes locais em condição irrigada, para quantificar o efeito do déficit hídrico na produtividade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 IMPORTÂNCIA, EVOLUÇÃO E PERSPECTIVAS DA CULTURA DO MILHO NO BRASIL

O milho possui grande destaque na produção de grãos no Brasil para a produção de rações, alimentação humana e fins industriais, sendo assim muito importante para o agronegócio nacional (BACCHI; CALDARELI; SEREIA, 2017). Cerca de 70 a 85% da produção mundial é destinada à alimentação animal (COUTO et al, 2017) e para o consumo humano, são destinados cerca de 15%, consumidos de forma direta ou indireta (PAES, 2006).

O Brasil ocupa a terceira posição no ranking mundial de produção e exportação de milho, perdendo apenas para os Estados Unidos e a China (COELHO, 2023). Na produção mundial prevista para a safra 2022/23 de 1,15 bilhões de toneladas do grão, o Brasil é responsável por 125 milhões de toneladas deste volume, segundo o boletim do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (FIESP, 2023).

Em escala mundial, segundo Santos e Freitas (2017), o Brasil possui um baixo rendimento comparado com países que possuem grandes produtividade de milho, como Estados Unidos, França, Argentina e China. Os autores relatam que mesmo sabendo da heterogeneidade brasileira, a baixa produtividade é uma preocupação. Os autores citam dados da Pesquisa Agrícola Municipal, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que embora existam exceções, como estados que superam a produção de 12.000 kg ha⁻¹, oito estados registram uma média das últimas três safras de aproximadamente 5.000 kg ha⁻¹, sendo este patamar alcançado na década de 1980 pelos países anteriormente citados, e atingido na década de 1990 pelos países considerados de média produtividade.

Segundo a CONAB (2023) a área cultivada de milho na primeira, segunda e terceira safra, referente à 2022/23 foi de 22,15 milhões de hectares, com 20% desta área cultivada na primeira safra, 77,1% na segunda safra e 2,9% na terceira safra. A produção nas três safras foi de 125,7 milhões de toneladas, gerando uma média nacional de 5.675,4 kg ha⁻¹. Galvão et al. (2014) citam que houve evolução na produção de milho ao realizar um comparativo com a produção dos anos 40 no Brasil. Nota-se o salto de 5,6 milhões de toneladas em 1944, para os

125,7 milhões de toneladas da última safra, a produção na época era de 1.359 kg ha⁻¹, aumentando nestes anos em 4,17 vezes a produção, com o aumento de 3,87 vezes a área cultivada. As médias da primeira, segunda e terceira safra são de 6.110, 5.640 e 3.621 kg ha⁻¹, respectivamente (CONAB, 2023). Assim nos anos que não ocorre déficit hídrico severo ou presença de geadas, mostra que o período da segunda safra no Brasil pode atingir produtividades próximas ao do período da safra.

O Estado do Paraná na primeira e segunda safra de milho 2022/23 totalizaram a produção de 17.789 mil toneladas, sendo 3.817 mil toneladas na primeira safra e 13.971 mil toneladas na segunda safra, período este responsável por 72,6% da produção estadual (DERAL, 2023). Além do grande potencial de produção, o milho paranaense possui grande agregação de valor, pois além da produção consolidada, é grande produtor nacional de aves, suínos e leite, sendo atividades de grande consumo de milho (MARTIN et al., 2011).

A safra que atinge maior produção de milho ocorre no período da segunda safra, e é justamente quando ocorrem maiores riscos, com destaque para a deficiência hídrica e geadas. Com isto é muito importante a escolha dos materiais genéticos mais adequados ao seu ciclo, pois segundo Silva e Silva (2017), o milho é muito estudado devido a sua grande importância no país, e com isso possui diversos híbridos de milho no mercado. Na escolha do híbrido ideal para o local de cultivo, a definição das melhores épocas de semeadura é fundamental, pois Conforme se aproxima ou distancia das épocas ótimas de semeadura para cada cultivar, ocorre respostas significativas nos componentes de produtividade (UATE et al., 2015).

O manejo de cultivo também é fundamental para o bom desenvolvimento da cultura, como as técnicas de plantio direto, que segundo Gonçalves et al. (2002), contribuiu expressivamente para minimizar os efeitos do estresse hídrico, principalmente quando cultivado no período da segunda safra.

Segundo Couto et al. (2017), a associação do alto potencial genético, melhoria das condições de instalação e condução da cultura, são de grande importância para o melhor desempenho da cultura. Fatores estes que se bem manejados e planejados, proverão o aumento da produtividade no Brasil, tornando o país mais competitivo, e colaborando com a ampla demanda mundial do grão.

2.2 IMPACTO DAS CONDIÇÕES HÍDRICAS NO RENDIMENTO DO MILHO

Para as culturas de sequeiro, as condições meteorológicas são o principal fator responsável pelas oscilações e frustrações das safras agrícolas no Brasil, especialmente para a cultura do milho (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Diversas análises da produção de milho apontam alta correlação entre variações/perdas de safras e as condições meteorológicas, especialmente o déficit hídrico (BERNINI et al., 2020). Destaca-se que a região Nordeste, Norte e Centro-Oeste apresentam perdas em virtude de longos períodos de déficit hídrico, e as regiões Sul e Sudeste, por estiagens frequentes (ROCHA et al., 2020).

Na condição de uma adequada disponibilidade hídrica e alta demanda evaporativa da atmosfera, a taxa de transpiração das plantas é elevada (BRITO et al., 2013; CRUZ et al., 2013). No caso de algum problema fisiológico, a planta não consegue absorver água suficiente para repor as perdas por transpiração, ou seja, quando há desequilíbrio entre transpiração e absorção, o potencial da água na planta começa a diminuir, iniciando o déficit hídrico, podendo causar estresse à planta, dependendo da intensidade do déficit (BERGAMASCHI et al., 2004 e 2006). Portanto, o déficit hídrico na planta é um evento comum, que pode ocorrer mesmo em condições de alta disponibilidade de água no solo (CRUZ et al., 2013).

Em algumas regiões, a frequência de déficit hídrico na fase de pendoamento é superior a 20%, não sendo liberado o cultivo do milho pelo zoneamento (FARIA JUNIOR et al., 2020). Dessa forma, sensível ao déficit hídrico, o milho é uma das culturas mais afetadas pela variabilidade do regime pluviométrico (GOMES et al., 2018). A produção também pode ser afetada drasticamente por estiagens curtas, quando ocorrem em períodos considerados críticos para a cultura (ALVES et al., 2021).

Geralmente, não é comum o uso de irrigação do milho no Brasil, em virtude da baixa rentabilidade da exploração nesse sistema de produção. Entretanto, é comum o milho participar da rotação e/ou sucessão de culturas em sistemas de produção irrigados, para melhorar as condições do solo e a absorção de água (PEGORARE et al., 2009; CRUZ et al., 2013).

A irrigação proporciona maiores produtividades ao milho em relação ao cultivo de sequeiro, permitindo a produção em épocas não convencionais, com

agregação de valor ao produto, especialmente para consumo in natura e para produção de sementes. Além de proporcionar melhor qualidade, reduz riscos de frustração de safra, comuns em muitas regiões do Brasil onde ocorrem veranicos durante a estação chuvosa (BERGAMASCHI et al., 2006).

A irrigação deve considerar os índices de necessidade hídrica do milho e seus coeficientes K_c , ao longo dos estádios fenológicos. Além disso, utilizando o monitoramento fenológico, pode-se obter alta eficiência no uso da água, do equipamento e da mão-de-obra, observando os períodos críticos (CRUZ et al., 2013). Destaca-se, que para a produção de milho, a irrigação deve ser suspendida quando a cultura entrar em processo de maturação fisiológica (MELO et al., 2018).

Para a produção de milho, atualmente, a irrigação por aspersão tipo pivô central tem sido a mais utilizada (OLIVEIRA et al., 2020). Enquanto em propriedades menores, normalmente, emprega-se também, o sistema de aspersão convencional, onde geralmente o milho é cultivado em sucessão com outras culturas (MONTEIRO; STÖCKER, 2020). Em áreas de várzea ou baixada e em terrenos sistematizados, tem sido utilizada a irrigação por sulco e a subirrigação, que é a irrigação feita por drenagens, permitindo que a planta use a água por ascensão capilar, em locais que o lençol freático é raso (PINTO et al., 2017).

Dessa forma, a ocorrência de estiagens, mesmo que curtas, frequentes nas regiões do Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, tornam-se graves quando coincidem com esses estádios em que as lavouras são mais sensíveis (BERGAMASCHI et al., 2004 e 2006).

Enquanto, as longas estiagens que são mais frequentes na região Nordeste e parte da região Norte, podem causar prejuízos, mesmo que ocorram fora do período crítico, medidas de mitigação podem reduzir os riscos das estiagens, como o escalonamento de épocas de semeadura, diversificação de genótipos de ciclos diferentes, emprego de práticas conservacionistas, como o plantio direto, e a observância dos zoneamentos agroclimáticos (BERGAMASCHI et al., 2004 e 2006).

Este conjunto de procedimentos tem permitido reduzir significativamente o impacto por estiagens de curta duração nas grandes regiões produtoras de milho do Brasil (LIMA et al., 2021). A utilização de irrigação, principalmente nestas áreas, vem aumentando cada vez mais no país, mas ainda se restringe a áreas relativamente pequenas (CRUZ et al., 2013; FERREIRA e VIEIRA FILHO, 2021).

Um ponto importante da utilização de irrigação é que além de aumentar significativamente os rendimentos de lavouras, reduz as flutuações de safras e estabiliza a renda das propriedades (MELO, 2021). Caso sejam incorporadas práticas para eliminar o déficit hídrico durante o curto período crítico do milho, sem outras limitações importantes, o produtor pode garantir elevados rendimentos (CRUZ et al., 2013; VIVAN et al., 2015). Dessa forma, pesquisas que auxiliem o produtor a identificar esses períodos e a frequência que ocorrem são fundamentais para garantir o sucesso no manejo.

Atualmente um grande aliado à redução do impacto produtivo na cultura do milho pela seca é o uso de bactérias da caatinga, utilizadas via tratamento de semente ou via sulco de plantio, obtendo resultados positivos de produtividade quando em períodos de déficit hídrico comparado a tratamentos sem a inoculação (DIAS et al., 2022).

Desta forma, visto os problemas enfrentados pelo déficit hídrico, o manejo adequado deve conter práticas de conservação de solo e água, rotação de culturas, escalonamento de épocas de semeadura e genótipos, manejo biológico, e respeitar os zoneamentos de cultivos da região. Para quando a alta necessidade hídrica da lavoura, durante o florescimento e início de formação de grãos (fase crítica), aliadas à elevada capacidade de resposta da cultura ao suprimento de água e nitrogênio, necessita cuidados especiais no período crítico (CRUZ et al., 2013). Nesta fase se combinado com as boas práticas mencionadas, a planta passará por menos estresses, entregando maior potencial produtivo.

2.3 FISIOLOGIA DO MILHO EM RELAÇÃO AO ESTRESSE HÍDRICO

Um dos períodos mais críticos para o déficit hídrico na produção do milho ocorre na época do florescimento porque o estigma da espiga (cabelo da boneca) pode secar e não conter umidade suficiente para suportar a germinação do pólen e o crescimento do tubo polínico até o ovário. Dois dias de estresse hídrico no florescimento diminuem o rendimento em mais de 20% (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

O milho está entre as culturas de maior consumo diário de água, considerando o K_c como parâmetro de comparação (SILVA et al., 2014). Durante a floração, por exemplo, 4 a 8 dias de déficit hídrico podem diminuir a produção em

mais de 50% (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). O efeito do déficit hídrico causado sobre o crescimento da planta causará efeito diretamente no alongamento celular, enquanto a divisão celular não é tão afetada (COSTA et al., 2008). Dessa forma, o milho, mesmo sob condições de falta de água, continua sua divisão celular, porém o alongamento é reduzido ou até paralisado, dependendo da duração e da intensidade do estresse (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

O milho quando submetido a déficit hídrico, fecha os estômatos, eliminam mecanismo de resfriamento e aumentam a temperatura da folha, afetando a respiração. Ocorre assim, um maior consumo de reservas, o que vai reduzir o crescimento, assim como a produção de matéria seca (BONO et al., 2001). A diminuição na fotossíntese se dá por fechamento estomático e redução da área foliar. O milho em condições de estresse hídrico, normalmente passa mais tempo respirando do que fotossintetizando (GUIMARÃES et al., 2020). Além disso, outro período alarmante para a ocorrência de déficit hídrico ocorre entre duas semanas antes e duas semanas após o espigamento, estando a maior redução associada ao estresse no espigamento (R1) (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014; WAGNER et al., 2013). É de suma importância que o período crítico seja bem caracterizado e identificado, para investigar os impactos de estiagens no rendimento e para a adoção de práticas de manejo adequadas (SANTOS ALMEIDA et al., 2017).

Durante o dia, o milho perde mais água do que consegue absorver até, aproximadamente, o meio da tarde. Em seguida, com a diminuição da demanda evaporativa atmosférica graças à queda de temperatura, a planta absorve mais água que a perda por transpiração, iniciando a recuperação do déficit, até que ocorra o equilíbrio dos potenciais durante a noite (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

Esse processo não é equilibrado se não houver reposição de água no solo pela precipitação pluvial ou por irrigação, o estresse se tornará irreversível (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Este procedimento depende da demanda evaporativa da atmosfera, da capacidade de armazenagem de água no solo, das características da cultura, do estágio de desenvolvimento da planta e do desenvolvimento radicular (CRUZ et al., 2013).

Uns dos fatores que o déficit hídrico ocasiona, além das perdas na fase crítica, é a redução da área foliar que ocorre em toda fase antecessora ao pendoamento, diminuindo a fotossíntese e interferindo em vários outros processos, além de alterar o ambiente físico das culturas, por modificar o balanço de energia do

sistema (BERGONCI et al., 2001). Os efeitos causados pelo déficit hídrico no milho são devidos às modificações na anatomia, morfologia, fisiologia e bioquímica das plantas. Com a redução na taxa de evapotranspiração, parte dessa energia que seria consumida neste processo será utilizada em outros processos, como no aquecimento do solo, no aquecimento do ar e no sistema como um todo, diminuindo a umidade relativa (CRUZ et al., 2013). Assim, em uma cultura submetida a déficit hídrico, haverá maior demanda evaporativa do ar junto às plantas, conduzindo-as a estresse mais rápido e intenso (MATZENAUER et al., 1995).

Em média, a cultura do milho necessita para obter seu rendimento máximo 650 mm durante o seu ciclo (BERGAMASCHI et al. 2001). A necessidade de água pode variar de 400 a 700 mm dependendo manejo do solo (sistema convencional ou plantio direto), das condições meteorológicas e da utilização de irrigação (ou não) e frequência das irrigações, (ALBUQUERQUE; RESENDE, 2002).

O déficit hídrico afetou negativamente o índice de área foliar e o acúmulo de matéria seca no milho, conforme identificado por França et al. (1999). A eficiência de interceptação de radiação depende do índice de área foliar. A ocorrência de estiagens provoca estresse e a captura da radiação solar incidente é reduzida pela diminuição da área foliar e pela murcha das folhas. Essa consequência do déficit hídrico sobre a área foliar é de caráter permanente sendo que, no caso de espécies de hábito de crescimento determinado, não há possibilidade de compensação pelo aumento do número de folhas (FRANÇA et al., 1999; CRUZ et al., 2013).

Nesse sentido, diversas pesquisas foram realizadas para identificar o impacto do déficit hídrico no milho. Bergamaschi et al. (2006) avaliaram o impacto do déficit hídrico no rendimento de grãos de milho e a eficácia da irrigação em todo ciclo e, especificamente, no florescimento. Os autores identificaram que a maior redução na produtividade ocorre em consequência do déficit hídrico na polinização, formação do zigoto e desenvolvimento inicial do grão, numa relação quadrática. Nesse período, a razão ETR/ET_0 explica quase 80% das variações na produção de grãos, que se estabiliza acima de uma razão de 0,7.

Analisando parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro, Silva et al. (2021) identificaram que as plantas submetidas ao déficit hídrico nas fases de pendoamento e floração sofreram variação no número de grão por espiga e tiveram baixa produtividade

quando comparadas às plantas submetidas na fase de grão farináceo. A temperatura e umidade do ar não influenciaram na limitação térmica para o desenvolvimento do milho durante todo o ciclo. Plantas submetidas ao déficit hídrico na fase de pendramento e floração foram menos produtivas.

Bernini et al. (2020) trabalharam com a seleção fenotípica de híbridos de milho para ambientes de baixa altitude e déficit hídrico com experimento implantado em Cáceres, MT na segunda safra de 2017/18. Os autores identificaram que os híbridos comerciais AG8088 PRO2, DKB177 PRO3, MG600 PW e 30F53 VYH foram favoráveis para região de estudo, por apresentarem produtividade média alta, sendo recomendados para cultivo no Sudoeste do Mato Grosso. Os autores concluíram que o florescimento masculino, altura de plantas e stay-green são os principais caracteres de seleção fenotípica para discriminação de híbridos para programas de melhoramento visando tolerância à seca.

Kappes et al. (2010) avaliaram a germinação, o vigor de sementes e o crescimento de plântulas de híbridos de milho (XB 6010, XB 6012, XB 9003 e AG 9010) submetidas a condições de déficit hídrico. Foi identificado pelos autores que o déficit hídrico provoca redução no desempenho de sementes de híbridos de milho, sendo que estes apresentaram comportamento diferenciado entre si quanto à tolerância em tal condição. Há redução da germinação, do vigor de sementes e do crescimento de plântulas de milho à medida que o potencial osmótico se torna mais negativo.

Martins et al. (2010) buscaram identificar o potencial hídrico foliar das plantas de milho sobre déficit hídrico no estágio inicial de desenvolvimento reprodutivo, com experimento conduzido no interior de uma cobertura móvel "Rainout shelter". O déficit hídrico foi de aproximadamente 50 mm de ETo acumulada. O trabalho demonstrou que a cobertura móvel foi acionada quando da ocorrência de chuvas, impedindo que esta ocorresse sobre a área experimental. Determinou-se o conteúdo de água disponível nas camadas de 0-10, 10-25, 25-55 e 55-85 cm de profundidade e variação diária do potencial hídrico das folhas de milho. Não foram observadas diferenças entre os tratamentos para o potencial de água na folha. O potencial hídrico foliar em plantas de milho não apresenta variação para déficit hídrico de 50 mm de evapotranspiração de referência acumulada.

Henrique et al. (2021) avaliaram a influência do déficit hídrico na germinação e vigor de sementes de dois genótipos comerciais de milho, induzido por

diferentes potenciais osmóticos. Foi identificado, que o déficit hídrico, simulado com solução de cloreto de sódio provoca redução no desempenho de sementes de híbridos de milho. Os genótipos de milho respondem diferentemente a tolerância em condições de estresse provocado por indisponibilidade de água durante a germinação.

Leite Junior et al. (2020) avaliaram sementes de milho submetidas ao déficit hídrico no momento do estabelecimento da cultura no campo. Foi avaliada a cultivar SHS 3031 quanto a emergência e vigor vegetativo, em maio de 2015 em Três corações, MG. identificados autores concluíram que plantas sob menor período de estiagem apresentaram maior percentual de emergência e vigor vegetativo.

2.4 A MODELAGEM

A definição de modelos segundo Marin (2016) é um padrão que representa ou descreve o funcionamento de algo em estudo, bem como um sistema ou conceito. Assim modelos de simulação têm por finalidade representar a realidade a partir de uma descrição verbal, de um desenho esquemático simples ou como um conjunto complexo de equações descrevendo numericamente um determinado sistema.

Os modelos podem ser utilizados para estudar uma série de variáveis relacionadas ao desenvolvimento e produtividade vegetal, ajudando a interpretar o comportamento de uma determinada cultura no seu contexto ambiental, avaliar seu potencial produtivo em diferentes condições, testar hipóteses, podendo entender melhor os processos das plantas, bem como estimular a junção interdisciplinar, auxiliando em tomadas de decisão (MARIN, 2016)

O objetivo da modelagem não é extinguir a experimentação convencional, mas tornar os estudos científicos mais eficientes, de maneira rápida e menos onerosa, sendo também uma excelente ferramenta na tomada de decisão no meio agrícola (CORRÊA et al. 2011). Além da tomada de decisão, é uma ferramenta muito importante na agilidade do melhoramento genético, pois segundo Nardino et al. (2016) a correlação entre fenótipo, genética e ambiente é muito importante para o melhorista selecionar os caracteres das cultivares.

De acordo com Bortolon et al. (2019), o uso da modelagem pode contribuir para previsão de safras nas regiões tropicais e subtropicais, de forma que

antecipa os resultados de pesquisa, auxiliando na tomada de decisão, o que poupa tempo e gastos, uma vez que calibrado o material genético é possível realizar simulações para outros locais em diferentes manejos.

Outro fator muito importante segundo Pinheiro et al. (2021), é o cenário do eminente impacto das alterações climáticas na agricultura, que faz com que o setor fique vulnerável, destacando a importância do uso dos modelos de previsão de safras, para conhecimento das lacunas de produtividade e potencial produtivo.

2.5 ORIGEM E TIPOS DE MODELAGEM

Modelos são utilizados desde o início da agricultura, surgindo do simples raciocínio de um produtor plantar determinada cultura e poder deduzir que época será a colheita, pelo simples fato de observar os ciclos das culturas de acordo com as sucessivas safras realizadas.

Um exemplo dos modelos empíricos mais antigos foi quando Réaumur em 1735 criou a metodologia de graus-dia, que associa o desenvolvimento da cultura com a temperatura da atmosfera. Posteriormente os maiores avanços da modelagem, segundo Sinclair e Seligman (1996), ocorreram a partir da década de 1960, quando a análise de sistemas e computadores modernos tornou-se parte das técnicas para cientistas agrícolas.

Entre os exemplos de trabalhos pioneiros na modelagem na cultura do algodão, Baker e Meyer (1966), realizaram estudos de modelos para avaliar o efeito sobre a fotossíntese líquida total diária, sob diferentes posições de linhas e tipos de plantio. Desta forma puderam fornecer uma previsão precisa para fotossíntese líquida.

Na década de 1970 De Wit, Brouwer e De Vries (1970), apresentaram a descrição de um modelo de simulação de sistemas fotossintéticos, que ao realizar a modelagem na cultura de milho, obtiveram resultados da simulação do modelo em vários locais, com semelhanças razoavelmente parecidas do simulado com o observado. Posteriormente Duncan (1971) na mesma cultura, desenvolveu modelos que estudaram os diferentes índices de área foliar com relação ao ângulo de inclinação na planta, avaliando como isto a influência na atividade fotossintética do dossel, onde verificou o percentual de perda da taxa

fotossintética de acordo com o índice de área foliar.

Monteith (1972) avaliou a eficiência que as plantas armazenam energia solar e seus produtos necessários para a produção de matéria seca. O autor destacou a necessidade dos modelos de não utilizar previsões no parâmetro de área foliar, mas sim medidas reais, sendo esta uma das maiores falhas dos modelos até ali desenvolvidos.

Desta forma a modelagem passou por vários processos de aperfeiçoamentos e evolução, mas de fato alguns dos primeiros modelos criados, fazem de alguma forma, mesmo que indiretamente parte do mecanismo dos modelos atuais (SINCLAIR; SELIGMAN, 1996). Assim é importante lembrar que os modelos não são restritos a apenas uma metodologia. Pois eles são dinâmicos, e utilizam desde métodos antigos até os mais atuais, que se juntam, sendo possível gerar cenários confiáveis e precisos para a modelagem agrícola.

Segundo Marin (2016) os modelos podem ser divididos em modelos empíricos e mecanísticos. Os modelos empíricos são baseados em cálculos matemáticos a partir da observação do funcionamento de um determinado sistema, como informações biológicas, ou alguma outra estrutura de interesse. Desta forma, o modelo pode ser composto de uma ou mais equações, que possuiu característica de potencial local, com dificuldades de obter precisão caso extrapole do contexto. Já os modelos mecanísticos possui mais complexibilidade, sendo aplicado em um maior número de fenômenos, e oferece respostas mais consistentes por ser baseado nos processos físicos e fisiológicos do crescimento vegetal da cultura de interesse. Segundo o autor os modelos mecanísticos tem maior confiabilidade quando se trata de sistemas vivos por serem compostos de vários subsistemas e componentes, que interagem entre si de modo não linear, assim sua complexibilidade torna-o mais recomendado.

Geralmente os modelos de produtividades possuem relação com modelos de balanço hídrico. Este tipo de modelos são muito utilizados para as estimativas de safras no Brasil, que são compostos pelos dados de entrada como características do solo, manejo da cultura, dados meteorológicos (ARAUJO et al., 2015). Este modelo funciona como base nos diversos tipos de modelagens existentes. O balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), descreve uma metodologia muito utilizada para o planejamento agrícola dos produtores, como por exemplo as melhores épocas de semeadura. Com o balanço hídrico é possível

identificar quando o solo está com deficiência ou excedente hídrico, que associado ao conhecimento da fase crítica da cultura, identifica-se se há ou não perdas de produtividade nas safras. Para identificação da severidade do nível de deficiência hídrica do solo à planta, existe o modelo denominado de Índice de Satisfação de Necessidade de Água (ISNA) (DOORENBOS; KASSAM, 1979), sendo a relação entre evapotranspiração real da cultura (ET_r) e evapotranspiração da cultura (ET_c). O valor desta relação pode ser considerado crítico de acordo com dados da literatura e também a sensibilidade da cultura pode ser analisada a campo, como o trabalho de Silva et al. (2017), que realizaram um zoneamento pedoclimático para semeadura simultânea do milho junto com brachiária no estado de Goiás, onde em cada fase da cultura foi estabelecido qual relação ET_r/ET_c era considerada sem restrição hídrica, estresse hídrico moderado ou estresse hídrico severo.

Nesta mesma linha Monteiro et al. (2017) criaram um modelo simples de simulação de produtividade do milho, em função das condições meteorológicas e de nível tecnológico. O modelo procurou ser o mais simples possível quanto aos parâmetros de entrada, procurando quantificar bem as perdas por déficit hídrico e a redução de produtividade de acordo com o nível tecnológico adotado. Assim obtiveram resultados que puderam ser recomendados para todo país, e de grande contribuição para demais aplicações de modelagem.

Monteiro et al. (2017) utilizaram o modelo de Doorenbos e Kassam (1979), e o balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955). Porém um fator importante é que reajustes foram feitos nos modelos utilizados no trabalho, sendo algo muito importante na modelagem, pois o reajuste para cada situação, cada localidade, melhora os resultados e torna a modelagem próxima a condição real, por ser uma ferramenta adaptável.

No Brasil como instrumento de política agrícola e gestão de riscos na agricultura, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) tem por finalidade minimizar os riscos quanto aos fenômenos meteorológicos. Também determina as melhores épocas de semeadura e a aptidão do município ao cultivo das culturas. Para esta metodologia utiliza-se um modelo que avalia os parâmetros de entrada como o clima, solo e os ciclos das cultivares da cultura de interesse, sendo esta metodologia validada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e adotada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (MAPA, 2019a). A metodologia utilizada consiste basicamente no uso do modelo de ISNA

(DOORENBOS; KASSAM, 1979), com aplicação do coeficiente da cultura (K_c) de acordo com a literatura para cada unidade da federação, e o balanço hídrico (MAPA, 2019b). Nesta metodologia Monteiro et al. (2017) advertem que leva em consideração as localidades de formas muito generalizadas, e que pode ser necessário ajustes, o que não deixaria a metodologia livre de falhas.

O modelo da FAO (1978) citado por Araujo et al. (2017) ao ser comparado com o modelo utilizado no ZARC, possuiu respostas muito eficientes para previsão de safras de milho e soja, os autores fizeram adaptações para municípios que possuem estações meteorológicas no Estado do Mato Grosso, sendo também uma ferramenta eficiente para estimativa de rendimento agroclimático.

A produção de grãos segundo Silva e Silva (2017), depende vários fatores importantes, como a interceptação de raios solares, eficiência do metabolismo, bem como a translocação e drenagem de fotoassimilados dos grãos. Com isso as plantas se adaptam ao ambiente que está implantada, respondendo de formas diferenciadas de acordo com o genótipo, e como as variações ambientais são imprevisíveis e incontroláveis, a escolha da época de semeadura ideal, será uma forma da planta obter o seu melhor desenvolvimento.

No Brasil existe ainda carência de informações de parâmetro de entrada para a simulação em modelos mecanísticos mais precisos, sendo necessário avanços nas pesquisas (MARIN, 2016). Entre os diversos modelos mecanísticos existentes, no Brasil os mais utilizados para sistemas agrícolas são: APSIM, SWAP, STICS e DSSAT.

O Simulador de Sistemas de Produção Agrícola (APSIM) (MCCOWN et al., 1996), gera modelos de culturas, pastagens, decomposição de resíduos, umidade no solo, fluxo de nutrientes e erosão. Com esta ferramenta pode-se criar vários cenários de culturas, avaliando o rendimento da cultura de acordo com o solo, clima, manejo, espaçamentos, etc. Uma de suas principais inovações é mostrar os efeitos do nitrogênio do solo nas culturas, e também a competição causada por cultivos em consórcios. Suas variáveis são analisadas dividindo-se em modelos que se sincronizam e processam os dados de forma bem satisfatória. É uma ferramenta muito dinâmica, que possuiu fácil alteração das variáveis da modelagens.

O modelo Solo, Água, Planta e Atmosfera (SWAP) (VAN DAM, 2000), tem a capacidade de simular o fluxo de água simultaneamente com o

transporte de soluto, fluxo de calor na zona não saturada, com interação no crescimento das culturas em condições de campo. Segundo Araujo et al. (2015) utiliza-se neste modelo a equação de Reichards (1931) para simular a movimentação vertical de água no solo, e para as definições das propriedades hidráulicas do solo as equações de Mualem-Van Genuchten. Sendo uma ferramenta muito importante para estudar conceito de fluxo e transporte, em experimentos de campo e laboratório, sendo possível selecionar melhores opções de manejo, podendo ser aplicados às condições geográficas dos determinados locais de interesse.

Em uma visão geral do modelo Simulador de Diversas Divisões para Culturas Padrão (STICS) (BEAUDOIN et al, 2009), segundo Brisson et al. (2003), o modelo simula o crescimento de culturas, disponibilidade de água e nitrogênio do solo, impulsionados pelos dados meteorológicos diários. Entre as variáveis que podem ser analisadas, destacam-se: rendimento das culturas, gasto de insumos, perdas de água e nitrogênio do solo. O modelo possui fácil adaptação às culturas, e sua estrutura baseia-se em relações bem conhecidas ou simplificadas de modelos já existentes. Este modelo tem a característica de todos os usuários formarem um grupo que participam da evolução do software, sendo então o STICS uma plataforma de modelagem interativa, não operando de forma fixa.

Desta mesma forma, plataformas de modelagens interativas com grupos de usuários, existe o modelo Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), segundo Jones et al. (2003), está operando na pesquisa desde a década de 1980, e incorpora em seu pacote 16 modelos de diferentes culturas, que é executado com um software que facilita a aplicação e avaliação dos diferentes propósitos de modelagens. Segundo os autores a versão DSSAT (CSM), foi a mais recente atualização do sistema, possuindo estrutura modular que estrutura o sistema, sendo de fácil substituição ou adição de módulos desejados. Entre seus módulos de grande importância está o módulo solo; o módulo modelo de colheita que simula diferentes culturas definindo arquivos de entrada das espécies fornecendo as diferentes variações dentro de uma mesma espécie, como a diferença entre cultivares; o módulo da umidade do solo; e um módulo para operar com a competição de luz e água entre o solo, planta e atmosfera.

Entre os modelos pertencentes a plataforma DSSAT destaca-se o modelo Colheita e Síntese de Recursos do Ambiente (CERES-maize) (JONES; KINIRY, 1986) utilizado

neste trabalho. Segundo Andrade et al. (2009) este modelo é usado para simular o crescimento da cultura do milho, dinâmica da água, temperatura e nitrogênio do solo. Segundo os autores, quando combinado com outros modelos do mesmo sistema, é possível simular sucessões de culturas, sazonalidade, variabilidade interanual do clima nas culturas, variabilidade espacial, sendo uma ferramenta de auxílio do manejo sítio-específico. De forma geral, este modelo é utilizado em pesquisas que visam avaliar os efeitos de clima, manejo, crescimento e produtividade do milho.

2.6 MODELO CERES-MAIZE APLICADO À CULTURA DO MILHO

Cardoso, Faria e Folegatti (2004), avaliando o efeito da época de semeadura no desenvolvimento e produção do milho de segunda safra, realizaram simulações com o modelo CERES-maize para Londrina, PR. Os autores utilizaram os dados da série histórica de 1976 até 1999 da estação agrometeorológica do IDR-Paraná. Os dados referentes ao solo foram de experimentos conduzidos pelo próprio instituto buscando representar o solo da região e os dados da cultivar os autores utilizaram da literatura para a cultivar XL-250. As simulações foram feitas para doze decêndios de janeiro a abril. Foi considerado um cenário de produção potencial sem restrição hídrica e um cenário de acordo com as condições pluviométricas do ano que foi feito o estudo, para obter o efeito de déficit hídrico.

No trabalho foi possível identificar a tendência da diminuição de produtividade potencial conforme foi atrasado o plantio de fevereiro a março. Também identificou-se a melhor resposta dos plantios de janeiro a fevereiro, por ter as fases mais sensíveis da cultura que são o florescimento e a formação da produção, em condições meteorológicas mais favoráveis, inclusive a maior incidência de radiação solar. O modelo representou a produtividade e as épocas de semeadura de acordo com o esperado para o período estudado. Os autores atentaram a um fator muito importante no uso do modelo CERES-maize, que ervas invasoras, insetos, fungos e deficiência de nutrientes com exceção do nitrogênio, toxidez e eventos catastróficos, interferem nos resultados.

Ritchie et al. (1998) fizeram importantes colocações sobre o funcionamento do modelo, mencionando que quando as informações de clima, da cultivar e quando bem conduzido o experimento de calibração, os resultados de rendimento ficam dentro dos limites aceitáveis de simulação, com diferenças de 5 a

15% quando comparados a rendimentos médios observados.

Gedanken et al. (2003) realizaram um trabalho com objetivo de avaliar o consumo de água e da rentabilidade na cultura do milho em três épocas de semeadura, em duas regiões de Minas Gerais, nos municípios de Sete Lagoas e Janaúba. Os tratamentos foram de sequeiro e irrigado (irrigado com dois volumes de aplicação de água: alta e média) e as épocas de semeadura nos meses de maio, outubro e dezembro. A cultivar utilizada foi a BR-201, o modelo CERES-maize foi ajustado de acordo com as informações de solo e clima das duas regiões e os parâmetros fisiológicos foram obtidos através de uma calibração para a cultivar em estudo realizada pela Embrapa, sendo a avaliação final produção destinada a milho verde e grãos. Com o modelo foi possível identificar qual o tipo de irrigação e o melhor custo benefício, assim como as produtividade de milho verde e em grão e suas respectivas receitas, que inclusive não mostrou diferenças marcantes entre os municípios.

Plagis e Von Pinho (2009) avaliaram o modelo CERES-maize simulando o florescimento e a produtividade de grãos, em diferentes níveis tecnológicos adotados por produtores da região de Lavras, MG, sendo estes baixo, intermediário e alto investimento. Neste trabalho os autores observaram o desenvolvimento da cultura e foram ajustando os valores dos coeficientes genéticos até obter respostas semelhantes ao desenvolvimento observado. A calibração foi realizada somente no primeiro experimento que foi de baixo investimento, o segundo, de alto investimento, serviu de validação. Os híbridos utilizados foram o GNZ 2005 e FRP25. O modelo foi eficiente no baixo investimento, mas no alto investimento houve superestimativa da produção, que pode ter sido causado pela alta dose de nitrogênio. Porém os valores ficaram dentro de limites aceitáveis que são de 5 a 8%. Os autores relataram que os dados de solo, necessários para a modelagem, são de fáceis obtenção em Universidades ou órgãos públicos, sendo os coeficientes genéticos os mais difíceis por não estarem sempre disponíveis, sendo necessário cuidados e pessoas qualificadas para sua obtenção. A execução do modelo mostrou ser sensível às doses de adubação, mostrando que as simulações podem ser realizadas inclusive para o planejamento do produtor antes do plantio sobre a dose de adubo a se utilizar.

Pereira et al. (2010) avaliaram a eficiência do modelo CERES-maize para simular as datas de florescimento e maturidade fisiológica, bem como os

componentes de produção e a produtividade de grãos para três diferentes datas de semeadura. O estudo foi realizado em Lavras, MG. Duas épocas de semeaduras foram realizadas na safra e uma no período da segunda safra, e as cultivares foram AG 7000, AG 8060, DKB 199, GNZ 2004 e P30F90. O experimento foi todo avaliado em regime de sequeiro, sendo a primeira época de semeadura utilizada para calibração do modelo e as demais datas serviram como dados independentes para avaliação.

Neste trabalho os autores verificaram valores muito semelhantes aos dados reais para data de florescimento e maturidade fisiológica. Mas os componentes de produção e produtividade de grãos apresentaram-se mais altos do que os observados na maioria dos híbridos na última época de semeadura, que foi atribuído a diferença da época de calibração realizada no verão e que também condições não favoráveis ao desenvolvimento da cultura afetaram a eficiência do modelo. Concluíram que o modelo para os componentes de produção e produtividade de grãos, necessita de ajustes para condições tropicais, principalmente na questão de déficit hídrico. Porém as datas de florescimento e maturidade fisiológica possuiu um ótimo desempenho.

Amaral et al. (2015), com o objetivo de parametrizar o modelo CSM-CERES-maize para diferentes cultivares utilizadas por produtores familiares no Rio Grande do Sul, avaliaram o desempenho do modelo para simular crescimento, desenvolvimento e produtividade de grãos. A semeadura foi feita na safra de verão, sendo o experimento para parametrização conduzido no município de Pelotas, RS, onde não foi permitido estresse hídrico e nutricional para obter a produção potencial. O experimento para validação do modelo foi realizado no município de Canguçu, RS em uma lavoura comercial em regime de sequeiro para avaliar a capacidade preditiva do modelo. As cultivares avaliadas foram Amarelão, AL 30, AG 5011, AG 122. Na condição de sequeiro o modelo subestimou a data de antese e superestimou a maturidade fisiológica, sendo possível não ter considerado corretamente fatores como déficit hídrico e efeito do fotoperíodo, ou pode ter sido pelas formas que foram avaliados estes parâmetros no campo.

Neste trabalho, a produtividade e massa seca da parte aérea obtida tanto em condição experimental para parametrização, e em condição de campo para a validação, estão de acordo com as informações existentes na literatura, sendo desta forma dados que podem ser utilizados para simular outros modelos de

produção para a cultura do milho. O modelo CERES-maize atendeu satisfatoriamente as simulações de crescimento, desenvolvimento e produtividade, satisfazendo a simulação tanto para produtividade de grãos e para silagem na região.

Vivan et al. (2015) realizaram um estudo sobre a identificação e consequências de déficit hídrico na produtividade de grãos para as culturas da soja, milho e feijão, assim como a renda bruta e lucratividade, na região de Santiago, RS. Os dados de calibração foram retirados da literatura, porém estes dados foram obtidos na região do estudo e os dados climáticos foram do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de São Luiz Gonzaga, de 1961 a 2010. A cultivar de soja foi a CD 219, milho 32R22 e o feijão IPR 88. Nas simulações foi utilizado sistema DSSAT e os módulos foram para soja, CROPGRO-soybean, do milho, CERES-maize, e do feijão, CROPGRO-drybean. De acordo com as respostas obtidas nos modelos, a redução de 50% da produção potencial de grãos é notada em mais de 40% dos anos em estudo. O milho foi a cultura com maior custo total, renda bruta e lucro, seguido por feijão e soja. Com este estudo foi possível identificar as reduções de produção das culturas devido à variabilidade meteorológica.

Junior et al. (2018) realizaram a calibração dos coeficientes genéticos para o milho pipoca, com o propósito de simular a produção em diferentes épocas de semeadura e definir a melhor época de semeadura na segunda safra. O experimento foi realizado em Tangará da Serra, MT, a cultivar utilizada foi a AP6002. Foram realizados todos os processos para a calibração do modelo e as informações meteorológicas foram obtidas através de uma estação automática no local com um histórico de 12 anos de coleta de dados. As simulações foram feitas para seis datas de semeadura no período da segunda safra. Foi notado nas simulações que em alguns tratamentos as menores lâminas resultaram em subestimação de produtividade e maiores lâminas a superestimação. Porém os autores notaram que após o modelo estar corretamente calibrado, respondeu as variáveis meteorológicas quanto ao ciclo no decorrer das datas simuladas. Foi possível concluir que o atraso da semeadura provocou redução na produtividade e que o modelo CERES-maize foi eficiente em simular a produtividade em diferentes condições hídricas.

Nas Filipinas, Balderama et al. (2016) usaram o modelo CERES-maize, tendo em vista escassez hídrica da região e realizaram calibrações de diferentes híbridos de milho para melhor aproveitar os recursos hídricos realizando

projeções para anos futuros, o modelo produziu alta eficiência na simulação, e foi possível identificar redução de produtividade de 44% em 2020 e 35% em 2050. Os autores concluíram que o modelo pode ser usado como ferramenta assertiva de tomada de decisões para os órgãos de agricultura e governo, que visam interesse nas simulações.

Analisando os impactos dos efeitos ENOS, em Tangará da Serra, MT, Barbieri et al. (2020) realizaram um estudo com o modelo CERES-maize, com três híbridos de milho em quatro épocas de semeadura. O modelo após calibrado demonstrou ser uma excelente ferramenta para realizar simulações. Foram realizadas simulações com cenários de El niño, Lã nina e neutralidade, e o modelo demonstrou as épocas de semeadura mais adequadas para aquela localidade e os melhores híbridos.

García-Montesinos et al. (2020) avaliaram o modelo CERES-maize no sul do México com variedades crioulas e híbridos de milho, para conhecer a dinâmica das variabilidade biológica e ambiental sobre a produtividade. Verificaram que o modelo subestimou em média 10% a produtividade de grãos, sendo considerado bom.

No Quênia, Kipkulei et al. (2022), utilizaram diferentes híbridos de milho para avaliar a eficiência de adubação, uso da água e épocas de semeadura. O modelo direcionou as melhores respostas nas variáveis avaliadas, sendo possível com os resultados tomar iniciativas de agricultura de precisão e otimização de milho nestas regiões.

Noriega-Navarrete et al. (2023), realizaram um estudo no México, para obter os coeficientes necessários para calibrar o modelo CERES-maize com metodologias não destrutivas. Os autores avaliaram 27 híbridos brancos e 14 amarelos, em plantio direto em condição irrigada. Sem métodos destrutivos, o modelo calibrado apresentou bom desempenho com r^2 variando de 0,98 e 0,97. Os autores indicaram o uso do modelo para produtividade de grãos dos híbridos calibrados para diferentes localidades do país.

Em Lavras, MG, Pereira et al. (2010) testou a eficiência do modelo CERES-maize com cinco híbridos de milho em três épocas de semeadura no cultivo de verão. O modelo identificou que a semeadura em janeiro foi menos produtiva do que novembro e dezembro, mostrou alta eficiência na fenologia tanto de antese e maturidade fisiológica, e a produtividade de grãos foi classificada como boa, estando

os valores de RMSE inferiores a 20%. Sendo considerado o modelo CERES-maize uma boa ferramenta para simulação das características agrônômicas do milho.

Na China, devido a escassez hídrica nos anos mais secos, Rugira et al. (2021) desenvolveu um estudo para avaliar o modelo CERES-maize para definir a melhor época de semeadura e o uso mais racional da água. O modelo apresentou grande consistência entre os resultados observados e simulados variando o RMSE de 0,77 a 21,6%. O modelo contabilizou a quantidade de água necessária para a produtividade ótima sem desperdícios e identificou as melhores épocas de semeadura para melhor aproveitamento.

Outro estudo na China foi realizado por Song e Jin (2020) para melhorar a eficiência do modelo CERES-maize quando submetido as condições de déficit hídrico. Nas simulações realizadas em condições irrigadas o modelo simulou bem a produtividade, mas quando submetidas a déficits hídricos mais extremos, as simulações caíam de qualidade. Para melhorar a eficiência os autores fizeram alterações em coeficientes mais específicos da espécie, conseqüentemente, o modelo simulou melhor a produtividade do milho quando submetido aos déficits hídricos mais extremos.

Em Cuba González et al. (2021) avaliou o modelo CERES-maize para quantificar a melhor densidade de plantas em função da adubação tendo como base o tipo de solo. O modelo foi eficiente na demonstração de qual adubação associada a densidade de planta foi melhor em cada tipo de solo.

O modelo CERES-maize além de estimar a produtividade de grãos também pode ser direcionado para produção de silagem. Melo et al. (2021) no Estado de Minas Gerais, utilizou o modelo para simular a produção de silagem para 18 municípios, em 52 datas de semeadura ao longo do ano, irrigado e sequeiro. O modelo mostrou que a silagem em condição de sequeiro apresenta maior variabilidade interanual e menor qualidade de silagem comparada à irrigada e em condições ótimas de umidade do solo, fatores climáticos como temperatura e radiação solar são determinantes para maior desempenho da cultura.

Entre todos os autores que trabalham com modelagem citados anteriormente, a maioria não descarta a necessidade da realização de novos trabalhos com diferentes condições, como diferentes tipos de solo, fertilidade, clima e genótipos, para obtenção de mais informações para estimativas mais confiáveis, para generalizar a aplicabilidade da informação para uma ampla região.

3 REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P. E. P.; RESENDE, M. Cultivo do milho: manejo de irrigação. **Embrapa Milho e Sorgo-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2002.
- ALVES, M. P.; MINUZZI, R. B.; CARON, M. L. Identificação De Estiagens E Estimativas De Produtividade De Milho Para O Município De Campos Novos, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Climatologia**, n. 17, v. 28, p. 101-117, 2021.
- AMARAL, T. A.; LIMA, A. C. R. de; ANDRADE, C. de L. T. de; ANJOS E SILVA, S. D. dos. Parametrização e avaliação do modelo CSM-Ceres-Maize para cultivares de milho recomendadas para a microrregião de Pelotas, RS. **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2015.
- ANDRADE FARIA JUNIOR, C.; LOURENÇO DE FREITAS, P. S.; DALLACORT, R.; SCABORA MIOTO, L.; BARBIERI, J. D. Zoneamento agrícola da cultura do milho pipoca para o estado de Mato Grosso. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science/Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 13, n. 1, 2020.
- ANDRADE, C.; AMARAL, T. A.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; HEINEMANN, A. B.; GARCIA y GARCIA, A.; TOJO-SOLER, C. M.; SILVA, D. de F.; HICKMANN, C.; SANTANA, C. B. de.; MOURA, B. F.; CASTRO, L. A. de. Modelagem do crescimento de culturas: aplicações à cultura do milho. **Embrapa Arroz e Feijão-Documentos (INFOTECA-E)**, 2009.
- ARAUJO, G. L.; MONTOVANI, E. C.; VIEIRA, G. H. S.; COSTA, M. S. Modelos para a estimativa da produção de biomassa aplicados à cultura do milho. **Revista Pensar Acadêmico**, v. 12, n. 1, p. 43-56, 2017.
- ARAUJO, M. M. V.; PIRES, D. Á.; JARDINI, D. C.; PIRES, A. P. Estimativa de produção das culturas de soja e milho através de parâmetros agroclimatológicos. **Agrarian**, v. 10, n. 38, p. 311-320, 2017.
- BACCHI, M. D.; CALDARELLI, C. E.; SEREIA, V. J. Desempenho das exportações brasileiras de milho: uma análise de Constant-Market-Share para o período 2002 a 2012. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 39, n. 3, p. 271-279, set/dez, 2017.
- BAKER, D. N.; MEYER, R. E. Influence of stand geometry on light interception and net photosynthesis in cotton. **Crop Science**, v. 6, n.1, p. 15-19, 1966.
- BALDERAMA, O.; ALEJO, L.; TONGSON, E. Calibration, validation and application of CERES-Maize model for climate change impact assessment in Abuan Watershed, Isabela, Philippines. **Climate, Disaster and Development Journal**, v. 2, n. 1, p. 11-20, 2016.
- BEAUDOIN, N.; MARY, B.; LAUNAY, M.; BRISSON, N. **Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model**. Quae, 2009.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MÜLLER, A. G.; FRANÇA, S.; PEREIRA, P. G. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 243-249, 2006.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **Milho**. In: Monteiro, J. E. B. A. (ed.) Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, Cap.14, p.239-260, 2009.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, v. 84, 85p. 2014.

BERGAMASCHI, H.; RADIN, B.; ROSA, L. M. G.; BERGONCI, J. I.; ARAGONÉS, R.; SANTOS, A. O.; Langensiepen, M. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorologia**, v. 1, n. 1, p. 23-7, 2001.

BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; SANTOS, A. O.; FRANÇA, S.; RADIN, B. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 7, p. 949-956, 2001

BERNINI, C. S.; SANTOS, F. A. S.; SILVA, D. S.; FIGUEIREDO, Z. N. Seleção fenotípica de híbridos de milho para ambientes de baixa altitude e déficit hídrico. **Nativa**, v. 8, n. 2, p. 172-177, 2020.

BONO, L.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G.; FRANÇA, S.; RADIN, B.; SANTOS, A.; BERGONCI, J. I. Alterações no padrão de resposta à luz da condutância estomática do milho causadas pelo déficit hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 1, p. 27-34, 2001.

BORTOLON, E. S. O.; BORTOLON, L.; LEITE, L. F. C.; JUNIOR, A. L. Novas abordagens, tendências e oportunidades no uso de modelos de simulação para a avaliação de sistemas agrícolas em regiões tropicais. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 4, p. 874-883, 2019.

BRISSON, N.; GARY, C.; JUSTES, E.; ROCHE, R.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; ZIMMER, D.; SIERRA, J.; BERTUZZI, P.; BURGER, P.; BUSSIÈRE, F.; CABIDOUCHE, Y. M.; CELLIER, P.; DEBAEKE, P.; GAUDILLÈRE, J. P.; HÉNAULT, C.; MARAUX, F.; SEGUIN, B.; SINOQUET, H. An overview of the crop model STICS. **European Journal of agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 309-332, 2003.

BRITO, M. E. B.; DE ARAÚJO FILHO, G. D.; WANDERLEY, J. A. C.; DE MELO, A. S.; DA COSTA, F. B.; FERREIRA, M. G. P. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, 2013.

CARDOSO, C. O.; FARIA, R. T. de; FOLEGATTI, M. V. Simulação do rendimento e riscos climáticos para o milho safrinha em Londrina-PR, utilizando o modelo CERES-Maize. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 2, p. 291-300, 2004.

COÊLHO, J. D. **Agricultura: Milho Produção e Mercado**. 2023.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra Brasileira de grãos**. v.10, n.9, jun. 2023. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 09 ago. 2023.

COSTA, J. R. D.; DE PINHO, J. L.; PARRY, M. M. Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 443-450, 2008.

COUTO, C. A. do; SILVA, É. M. da; SILVA, A. G. da; OLIVEIRA, M. T. P.; VASCONCELOS, J. C. de; SILVA, A. R. da; SOBREIRA, E. de A.; MOURA, J. B. de. Desempenho de cultivares de milho destinados para produção de milho verde e silagem. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 6, n. 1, p. 232-251, jan/abr, 2017.

CRUZ, J. C.; MAGALHÃES, P. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; & MOREIRA, J. A. A. **Milho: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Área de Informação da Sede-Col Criar Plantar ABC 500P/500R Saber (INFOTECA-E), 2013.

DANE, J. H.; HOPMANS, J. W. Hanging water column. In: DANE, J. H.; TOPP, G.C. (Ed). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v. 4. p. 680-683.

DAY, P. R. **Particle fractionation and particle-size analysis**. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1965.

DE WIT, C. T.; BROUWER, R.; DE VRIES, P. The simulation of photosynthetic systems. In: SETLIK, I. **Prediction and measurement of photosynthetic productivity**. Wageningen: Proceedings IBP/PP Technical Meeting Trebon, 1970, p. 47-70.

DERAL. Departamento de Economia Rural. **Sistema de acompanhamento de safra subjetiva / PPS**. 2023. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/system/files/publico/Safras/resumo_pss.pdf. Acesso em: 09 ago. 2023.

DIAS, K. C. F. P.; SILVA SOUZA, I. J.; DINAS, S. S. E.; OLIVEIRA, M. C. B.; FERREIRA, V. Q.; BARROS, Y. C.; JESUS SANTOS, A. F. Proteção para a cultura de milho contra a seca mediada por bactérias da Caatinga. **Agrometeoros**, v. 30, 2022.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrigation and drainage paper**, v. 33, p. 257, 1979.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. Soil water retention curve. version 3. **Piracicaba: Esalq**, v. 1, 2001.

DUNCAN, W. G. Leaf angles, leaf area, and canopy photosynthesis. **Crop Science**, v. 11, n. 4, p. 482-485, 1971.

EMBRAPA. **Manual de análise química dos solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, 2009. 627p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Report on the agro-ecological zones project. **Methodology and results for Africa**, v. 2. Rome: FAO, 1978.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. **Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 1-27, 2010.

FERREIRA, Z. R.; VIEIRA FILHO, J. E. R. Irrigação pública e fruticultura no Semiárido. **Revista de Política Agrícola**, v. 1, n. 1, p. 34, 2021.

FIESP. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. **Safra mundial de milho 2022/23: 10º levantamento do USDA**. 2021. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=288086>. Acesso em: 08 set. 2023.

FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G. Modelagem Do Crescimento De Milho Em Função Da Radiação Fotossinteticamente Ativa E Do Acúmulo De Graus-Dia, Com E Sem Irrigação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 1, p. 59-66, 1999

GALVÃO, J. C. C.; MIRANDA, G. V.; TROGELLO, E.; FRITSCHÉ-NETO, R. Sete décadas de evolução do sistema produtivo da cultura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, p. 819-828, nov/dez, 2014.

GARCÍA-MONTESINOS, E. L.; FERNÁNDEZ-REYNOSO, S. D. B. RUBIO-GRANADOS, E.; MARTÍNEZ-MENEZ, R. M.; Tijerina-Chávez, L. Rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en la mixteca, calculado con DSSAT. **Terra Latinoamericana**, v. 38, n. 4, 2020.

GEDANKEN, A.; MANTOVANI, E. C.; MANTOVANI, B. H. M.; SANS, L. M. A.; FREITAS, P. S. L. de. Utilização do modelo Ceres-Maize na avaliação de estratégias de irrigação na cultura do milho em duas regiões do Estado de Minas Gerais. **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2003.

GOMES, C. A.; ASSIS, A. C. D. L. P.; ALVES, D. P.; DOS REIS, M. R. Aplicação de ácido salicílico como atenuador dos efeitos de déficit hídrico no milho. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 4, n. 3, p. 0359-0363, 2018.

GONÇALVES, S. L.; CARAMORI, P. H.; WREGE, M. S.; SHIOGA, P.; GERAGE, A. C. Épocas de semeadura do milho “safrinha”, no Estado do Paraná, com menores riscos climáticos. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1287-1290, 2002.

GONZÁLEZ, O. R.; BACALLAO, R. F.; CÓRDOVA, N. H.; CARREÑO, F. S.; MOMPIÉ, E. J.; VIERA, D. G.; MONTENEGRO, R. V. Simulation of management strategies from the DSSAT model to increase the yields of a corn cultivar Simulación de estrategias de manejo a partir del modelo DSSAT para incrementar los rendimientos de un cultivar de maíz. **Cuban Journal of Agricultural Science**, v. 55, n. 2, p. 1, 2021.

GROHMANN, F. Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solo em do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Cidade, v. 19, n. 21, p. 319-328, 1960.

GUIMARÃES, P. S.; ROCHA, D. S.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z. Conteúdo de carboidrato foliar em híbridos de milho submetidos à restrição hídrica. **Evidencia**, v. 19, n. 2, p. 93-112, 2019.

HENRIQUE, I. G.; BOSQUEIRO, R. O.; KOTSUBO, R. M.; BOTELHO, S. D. C. C. Déficit hídrico e a germinação de sementes de híbridos de milho. **Nativa**, v. 9, n. 3, p. 240-246, 2021.

HOOGEBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; BATCHELOR, W. D.; BOWEN, W. T.; HUNT, L. A.; PICKERING, N. B.; SINGH, U.; GODWING, D. C.; BAER, B.; UEHARA, G.; BALAS, D. (Ed.). **DSSAT v3, decision support system for agrotechnology transfer**. Honolulu: University of Hawaii, v. 2, cap. 2, p. 95-244, 1994.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; PORTER, C. H.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; BOOTE, K. J.; SINGH, U.; URYASEVA, O.; BOWEN, W. T.; GIJSMAN, A. J.; DU TOIT, A. S.; WHITE, J. W.; TSUJI, G. Y. **Decision support system for agrotechnology transfer: version 4.0 (compact disc)**. Honolulu: University of Hawaii, 2003.

IAPAR. Instituto Agrônomo do Paraná. **Médias históricas em estações do IAPAR**. Londrina: IAPAR, 2019. Disponível em: http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Londrina.htm. Acesso em: 10 jul. 2019.

JAMIESON, P. D.; PORTER, J. R.; WILSON, D. R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field crops research**, v. 27, n. 4, p. 337-350, 1991.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R. **Ceres-maize; A simulation model of maize growth and development**. eds. 1986.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European journal of agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 235-265, 2003.

JUNIOR, C. A. F.; FREITAS, P. S. L.; DALLACORT, R.; VORONIAK, J. M.; SOUZA, A. C. S.; MIOTO, L. S.; BARBIERI, J. D. Calibração dos coeficientes genéticos e simulação da produtividade do milho pipoca de segunda safra para Tangará da Serra, Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 2, p. 201-210, 2018.

KAPPES, C.; DA COSTA ANDRADE, J. A.; HAGA, K. I.; FERREIRA, J. P.; ARF, M. V. Germinação, vigor de sementes e crescimento de plântulas de milho sob condições de déficit hídrico. **Scientia agraria**, v. 11, n. 2, p. 125-134, 2009.

KIPKULEI, H. K.; BELLINGRATH-KIMURA, S. D.; LANA, M.; GHAZARYAN, G.; BAATZ, R.; BOITT, M.; SIEBER, S. Assessment of Maize Yield Response to Agricultural Management Strategies Using the DSSAT–CERES–Maize Model in TRANS NZOIA COUNTY IN KENYA. **International Journal of Plant Production**, v. 16, n. 4, p. 557-577, 2022.

LEITE JUNIOR, M. C. R.; RODRIGUES, A. S.; DA FONSECA, J. M.; DA COSTA BARBÉ, L.; DOBBS, L. B.; NICOLI, A.; BUENO, M. R. Emergência de semente de milho submetida ao déficit hídrico. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 3, p. 1329-1338, 2020.

LIBARDI, P. L. Água no solo. **Física do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 103-52, 2010.

LIMA, C. I. S. D.; SILVA, F. D. D. S.; FREITAS, I. G. F. D.; PINTO, D. D. C.; COSTA, R. L.; GOMES, H. B.; SILVA, B. K. D. N. Método Alternativo de Zoneamento Agroclimático do Milho para o Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 1057-1067, 2021.

LOAGUE, K; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of contaminant hydrology**, v. 7, n. 1-2, p. 51-73, 1991.

MAPA. **Parâmetros de risco climático.** Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuario/documentos/Parametrosderiscoclimatico.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2019b.

MAPA. **Zoneamento Agrícola.** Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuario/zoneamento-agricola>>. Acesso em: 21 jun. 2019a.

MARIN, F. **Princípios de modelagem de sistemas agrícolas.** [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em: https://sites.usp.br/gepema/wp-content/uploads/sites/156/2016/08/Texto_Intro_Modelagem.pdf. Acesso em: 15 jun. 2019.

MARTIN, T. N.; VENTURINI, T.; API, I.; PAGNONCELLI, A.; VIEIRA JUNIOR, P. A. Perfil do manejo da cultura de milho no sudoeste do Paraná. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 1, p. 1-8, jan/fev, 2011.

MARTINS, J. D., CARLESSO, R., KNIES, A. E., DE OLIVEIRA, Z. B., BROETTO, T.; RODRIGUES, G. J. Potencial hídrico foliar em milho submetido ao déficit hídrico. **Irriga**, v. 15, n. 3, p. 324-334, 2010.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; RIBOLDI, J. Relações entre rendimento de milho e variáveis hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 3, n. 1, p. 85-92, 1995.

MCCOWN, R. L.; HAMMER, G. L.; HARGREAVES, J. N. G.; HOLZWORTH, D. P.; FREEBAIRN, D. M. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. **Agricultural systems**, v. 50, n. 3, p. 255-271, 1996.

MCKEE, G. W. A Coefficient for Computing Leaf Area in Hybrid Corn 1. **Agronomy Journal**, v. 56, n. 2, p. 240-241, 1964.

MELO, C. O. D. Modificação no padrão de comportamento dos preços do milho no Paraná em 2001-2019. **Revista de Política Agrícola**, v. 1, n. 1, p. 7, 2021.

MELO, M. L. A.; CAMILO, J. A.; ANDRADE, C.; AMARAL, T. A.; de SOUZA, I. R. P.; SIMEÃO, R. M. Sowing period and estimated maize production for silage under tropical conditions. 2021.

MELO, R. F. de; de OLIVEIRA, A. R.; SIMOES, W.; SANTOS, M. D. S. **Desenvolvimento e produtividade do milho BRS Gorutuba sob diferentes lâminas de irrigação e adubação orgânica**. Embrapa Semiárido-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2018.

MONTEIRO, A. B.; STÖCKER, C. M. Espaçamento entrelinhas de semeadura e produtividade da cultura do milho irrigado por aspersão. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 8, n. 4, 2020.

MONTEIRO, J. E. B. D. A.; ASSAD, E. D.; SENTELHAS, P. C.; AZEVEDO, L. D. C. Modeling of corn yield in Brazil as a function of meteorological conditions and technological level. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 3, p. 137-148, 2017.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v. 9, n. 3, p. 747-766, 1972.

NARDINO, M.; BARETTA, D.; CARVALHO, I. R.; FOLLMANN, D. N.; KONFLANZ, V. A.; SOUZA, V. Q.; OLIVEIRA, A. C. de.; MAIA, L. C. Correlações fenotípica, genética e de ambiente entre caracteres de milho híbrido da Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 34, n. 3, p. 379-394, 2016.

OLIVEIRA, J. T. de; MIRANDA DE OLIVEIRA, R.; ALVES DE OLIVEIRA, R.; MIRANDA DE OLIVEIRA, E.; EVANGELISTA BOTELHO, M.; OLIVEIRA FERREIRA, P. M. Viabilidade Econômica De Irrigação Por Pivô Central Em Pequenas Áreas Cultivadas Com Feijão, Soja E Milho. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 14, n. 4, 2020.

PAES, M. C. D. Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho. **Embrapa Milho e Sorgo-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2006.

PAGLIS, C. M.; VON PINHO, R. G. Simulação de florescimento e da produção de milho através do modelo CERES: maize. **Ciênc. agrotec.**, v. 33, n. 2, 2009.

PEGORARE, A. B.; FEDATTO, E.; PEREIRA, S. B.; SOUZA, L. C.; FIETZ, C. R. Irrigação suplementar no ciclo do milho " safrinha" sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 262-271, 2009.

PEREIRA, A. M. D. A. R.; Von Pinho, R. G.; Paglis, C. M.; Pereira, J. L. D. A. R.; Altoé, T. F. Eficiência do modelo Ceres-Maize na simulação do desempenho de híbridos de milho. **Revista Ceres**, v. 57, p. 486-493, 2010.

PINHEIRO, A. G.; SOUZA, L.; JARDIM, A.; ARAÚJO JÚNIOR, G. D. N.; ALVES, C.; SOUZA, C.; SILVA, T. Importância dos modelos de simulação de culturas diante os impactos das alterações climáticas sobre a produção agrícola-Revisão. **Rev Bras Geo Fís**, v. 14, n. 6, p. 3648-3666, 2021.

PINTO, L. F. S.; MIGUEL, P.; PAULETTO, E. A. **Solos de várzea e terras baixas. Cultivo de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul**. Pelotas-RS, Brazil: Embrapa, p. 23-43, 2017.

RICHARDS, L. A. Capillary conductivity of liquid through porous media. **Physics**, v. 1, p. 318-333, 1931.

RITCHIE, J. T.; SINGH, U.; GODWIN, D. C.; BOWEN, W. T. Cereal growth, development and yield. In: **Understanding options for agricultural production**. Springer, Dordrecht, 1998. p. 79-98. ,

ROCHA, T. B. C.; VASCONCELOS, F. D. C.; SILVEIRA, C. D. S.; MARTINS, E. S. P. R.; SILVA, R. F. V. Veranicos no Ceará e Aplicações para Agricultura de Sequeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 435-447, 2020.

SANTOS ALMEIDA, A. C. dos; BONIFÁCIO, J.; PUSCH, M.; DE OLIVEIRA, F. C.; GESEINHOFF, L. O.; Biscaro, G. A. Produtividade e eficiência de uso da água em milho cultivado com diferentes estratégias de manejo hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 3, p. 1448, 2017.

SANTOS, G. R. dos; FREITAS, R. E. Competitividade do Brasil no complexo soja-milho-aves: Desafios e questões para as políticas públicas. **Radar**, v. 51, p. 33-37, jun. 2017.

SILVA, B. E. C.; SILVA, M. R. J. Viabilidade econômico-financeira da implantação da cultura do milho no município de Santa Teresa-ES. **Revista Univap**, v. 23, n. 43, dez. 2017.

SILVA, F. A. M. da.; SANTOS, K. de S.; EVANGELISTA, B. A.; MONTEIRO, J. E. B. de A. Zoneamento pedoclimático para a semeadura simultânea do milho e da braquiária no estado de Goiás. **Agrometeoros**, v. 25, n. 1, 2018.

SILVA, F. D.; EVANGELISTA, B. A.; MALAQUIAS, J.; GUERRA, A. F.; ROCHA, O. C. **Parâmetros hídricos, área foliar e coeficiente cultural (Kc) do consórcio milho-braquiária irrigado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2014.

SILVA, S.; DA PAZ SOUSA, A. C.; DA SILVA, C. S.; ARAÚJO, E. R.; DA SILVA SOARES, M. A.; TEODORO, I. Parâmetros Produtivos Do Milho Sob Déficit Hídrico Em Diferentes Fases Fenológicas No Semiárido Brasileiro. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 30-41, 2021.

SINCLAIR, T. R.; SELIGMAN, N. G. Crop modeling: From infancy to maturity. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 5, p. 698-704, set/nov, 1996.

SONG, L.; JIN, J. Improving CERES-Maize for simulating maize growth and yield under water stress conditions. **European Journal of Agronomy**, v. 117, p. 126072, 2020.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. Publications in climatology. **The water balance**, v. 8, p. 1-104, 1955.

UATE, J. V.; VON PINHO, R. G.; CANCELLIER, L. L.; CAMILO, A.; BERNARDO JÚNIOR, L. A. Y. Épocas de semeadura e distribuição espacial de plantas na produção de milho. **Revista Brasileira de milho e Sorgo**, v. 14, n. 3, p. 346-357, 2015.

VAN DAM, J. C. **Field-scale water flow and solute transport: SWAP model concepts, parameter estimation and case studies**=[Waterstroming en transport van opgeloste stoffen op veldschaal]. [sn], 2000.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VIVAN, G. A.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; PARIZI, A. R. C.; BARBOSA, F. da S.; SOARES, F. C. Rendimento e rentabilidade das culturas da soja, milho e feijão cultivados sob condições de sequeiro. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 5, 2015.

WAGNER, M. V.; JADOSKI, S. O.; MAGGI, M. F.; SAITO, L. R.; LIMA, A. D. S. Estimativa da produtividade do milho em função da disponibilidade hídrica em Guarapuava, PR, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 170-179, 2013.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M.. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

4 ARTIGO A – AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO MODELO CERES-MAIZE PARA PREVISÃO DE PRODUTIVIDADE E FENOLOGIA DO MILHO SEGUNDA SAFRA SEQUEIRO E IRRIGADO EM LONDRINA, PR, BRASIL

RESUMO

A previsão de safras é fundamental na agricultura. O modelo CERES-maize da plataforma DSSAT é um programa computacional desenvolvido para fazer simulações com a cultura do milho. O objetivo do trabalho foi calibrar e validar o modelo CERES-maize para o híbrido de milho Status, nos sistemas irrigado e sequeiro em duas safras em Londrina, PR. Foram realizados dois anos de experimentos, 2019 (semeadura 19/03/2019) e 2020 (semeadura 20/03/2020), no período da segunda safra (outono/inverno), em sistema irrigado e sequeiro. No ano 2019 foi calibrado o modelo em manejo irrigado e validado em sequeiro, e no ano 2020 foi validado o modelo nos dois sistemas de cultivo. Para analisar os dados estatisticamente foi realizada análise de percentual do RMSE, Viés, r^2 e índice “d” de concordância. Para o modelo obter bons resultados, foi necessário realizar ajustes nos coeficientes genéticos e fisiológicos para as condições do local. Houve desempenho satisfatório estatisticamente em todas as variáveis analisadas. A produtividade média observada, irrigado e sequeiro, foi de 6.828 e 5.238 kg ha⁻¹, respectivamente, e os valores simulados foram de 8.112 e 6.992 kg ha⁻¹, respectivamente no ano 2019 de calibração. Em 2020 no experimento de validação, a produtividade média observada em irrigado e sequeiro foi de 8.170 e 2.667 kg ha⁻¹, respectivamente e os valores simulados foram de 6.747 e 1.875 kg ha⁻¹, respectivamente. A análise de RMSE foi de 25,78% sendo considerada a simulação aceitável, viés de -2,90%, índice de concordância “d”, de 0,90 e r^2 moderado de 0,68. As simulações de massa seca da parte aérea, área foliar e fenologia também tiveram resultados aceitáveis estatisticamente. A produtividade de grãos, massa seca da parte aérea, mensuração de área foliar e fenologia simulados pelo modelo são aceitáveis, de acordo com análises estatísticas das comparações com as medições de campo, nas condições irrigado e sequeiro, em dois anos em Londrina, PR, Brasil. O modelo CERES-maize da plataforma DSSAT, quando calibrado corretamente para as condições locais, é uma ferramenta eficiente para simular cenários em diferentes condições hídricas e meteorológicas.

Palavra-chave: DSSAT, Modelagem, Previsão, *Zea mays* L.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE CERES-MAIZE MODEL FOR FORECASTING PRODUCTIVITY AND PHENOLOGY OF RAINFED AND IRRIGATED CORN SECOND SEASON IN LONDRINA, PR, BRAZIL

Harvest forecast is essential in agriculture. The CERES-maize model of the DSSAT platform is a computational program developed to carry out simulations with the corn crop. The objective of this work was to calibrate and validate the CERES-maize model for the Status corn hybrid, in the irrigated and rainfed systems in two harvests in Londrina, PR. Two years of experiments were carried out, 2019 (sowing 03/19/2019) and 2020 (sowing 03/20/2020), during the second harvest period (autumn/winter), in an irrigated and rainfed system. In 2019, the model was calibrated in irrigated management and validated in rainfed management, and in 2020 the model was validated in both cropping systems. To analyze the data statistically, an analysis of the percentage of RMSE, Bias, r^2 and "d" index of agreement was carried out. For the model to obtain good results, it was necessary to adjust the genetic and physiological coefficients for local conditions. There was statistically satisfactory performance in all variables analyzed. The observed average productivity, irrigated and rainfed, was 6,828 and 5,238 kg ha⁻¹, respectively, and the simulated values were 8,112 and 6,992 kg ha⁻¹, respectively in the 2019 calibration year. In 2020 in the validation experiment, the average productivity observed in irrigated and rainfed was 8,170 and 2,667 kg ha⁻¹, respectively and the simulated values were 6,747 and 1,875 kg ha⁻¹, respectively. The RMSE analysis was 25.78%, considered an acceptable simulation, bias of -2.90%, agreement index "d" of 0.90 and moderate r^2 of 0.68. The simulations of dry mass of the shoot, leaf area and phenology also had statistically acceptable results. The grain productivity, dry mass of the aerial part, measurement of leaf area and phenology simulated by the model are acceptable, according to statistical analyzes of comparisons with field measurements, under irrigated and rainfed conditions, in two years in Londrina, PR, Brazil. The DSSAT platform of the CERES-maize model, when correctly calibrated for local conditions, is an efficient tool for simulating scenarios under different water and meteorological conditions.

Keyword: DSSAT, Modeling, Forecasting, *Zea mays* L.

Introdução

A previsibilidade de safras é fundamental para o planejamento e o sucesso do agronegócio. A utilização de modelos corretamente adaptados às condições edafoclimáticas brasileiras, poupará tempo e recursos na busca crescente por sistemas de produção bem dimensionados e sustentáveis (Bortolon et al., 2019). Porém, para se obter resultados de relevância são necessárias constantes melhorias na relação entre experimentos e modelos (Pinheiro et al., 2021).

Ao observar os fatores que formam os sistemas produtivos, nota-se que a produção de fitomassa e grãos é dependente de vários fatores interligados, dentre os quais destacam-se os elementos meteorológicos (Amaral et al., 2015). Como exemplo, as fases críticas das culturas, como florescimento e enchimento de grãos, são altamente sensíveis à temperatura e estresses hídricos (Perondi et al., 2019). A radiação solar possui grande influência no rendimento potencial das culturas (Fattori Junior et al., 2019). Os modelos de simulação possibilitam considerar todas essas variáveis e quantificar a redução de produtividade das culturas (Perondi et al., 2019).

O modelo CERES-maize da plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) v.4.7.5 (Jones et al., 2003, Hoogenboom et al., 2017, Hoogenboom et al., 2019), é eficiente para fazer simulações com a cultura do milho. Possui potencial de auxiliar no planejamento e manejo agrícola, sendo possível entender a interação genética, fisiológica e ambiental, e as respostas da cultura a aplicação de fertilizantes e lâminas de irrigação (Boote et al., 1996).

São encontrados na literatura vários trabalhos utilizando o modelo CERES-maize, com resultados que comprovam sua eficiência em diversos aspectos pelo mundo todo. Porém nota-se poucos trabalhos para identificar a eficiência do modelo nas condições brasileiras, e os ajustes cabíveis para as diferentes condições edafoclimáticas que o país possui. Como exemplo, um estudo realizado em Cuba avaliou híbridos de milho, testando a densidade de cultivo, níveis de adubação e diferentes situações edafoclimáticas, gerando resultados dentro dos níveis estatísticos considerados excelentes em uma avaliação (González et al., 2021). No Brasil, no Estado do Mato Grosso, foram realizadas simulações com três híbridos de milho, na segunda safra em quatro épocas de semeadura, e foi realizado as simulações em anos com influência dos fenômenos ENOS. Nas condições

experimentais, o modelo mostrou com alto aproveitamento estatístico os impactos que os fenômenos causaram na produtividade da cultura (Barbieri et al., 2020). No norte da China, o modelo CERES-maize foi determinante para estabelecer a melhor época de semeadura e o uso racional de água para irrigação, tendo em vista a escassez deste recurso natural na região. O modelo forneceu satisfatoriamente as melhores épocas de semeadura e a necessidade de irrigação correta no estágio específico (Rugira et al., 2021). No Quênia foram realizados estudos com o modelo, para obter o nível mínimo de adubação e escolha das melhores épocas de semeadura com melhor retorno de rentabilidade, por se tratar de uma região de baixo rendimento pela variabilidade climática e baixa fertilidade do solo (Kipkulei et al., 2022).

Observando os trabalhos com funcionalidade positiva do modelo CERES-maize, propõe-se a hipótese de validar o modelo para o híbrido de milho Status, que é comumente plantado no Estado do Paraná, para as condições de solos e clima da região de Londrina.

Desta forma o presente trabalho teve como objetivo calibrar e validar a eficiência do modelo CERES-maize para o híbrido de milho Status, nos sistemas irrigado e sequeiro em duas safras em Londrina, PR.

Material e Métodos

Os ensaios de campo para obtenção das variáveis de entrada no modelo foram conduzidos em 2019 e 2020 na Estação Experimental do Centro Universitário Filadélfia – UniFil, Campus Palhano em Londrina, PR, (23°36'18" S, 51°20'01" W e altitude 514 metros). Com os resultados obtidos foi calibrado e validado o modelo CERES-maize da plataforma DSSAT v.4.7.5 (Jones et al., 2003, Hoogenboom et al., 2017, Hoogenboom et al., 2019), seguindo as orientações de parametrização de Hoogenboom et al. (2003) e Jones et al. (2003).

Dados climáticos

O clima da região foi classificado, segundo Köppen, como subtropical úmido (Cfa). Precipitação anual de 1.600 a 1.800 mm e temperatura média anual de 21,1 a 22 °C, sendo a temperatura média no verão de 24,1 a 25 °C e no inverno de 17,1 a 18 °C, segundo dados do Atlas Climático do Estado do Paraná (Nitsche et al., 2019).

Os dados meteorológicos diários e precipitação, temperaturas mínimas e máximas do ar e radiação solar global, foram mensurados por uma estação meteorológica automática completa (marca HOBO, modelo U30-NRC), localizada ao lado dos experimentos.

Caracterização do solo

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico (EMBRAPA, 2013), de textura muito argilosa. Para entrada de características físico-hídricas de solo, foram utilizados como base de referência dados de Faria e Caramori (1986) e Moraes, Debiasi e Franchini (2018).

Uma análise química do solo foi feita antes da semeadura nos dois anos para adubação da cultura (Tabela 1). E como base de recomendação de adubação foi utilizado o Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná (Pavinato et al., 2017).

Tabela 1. Atributos químicos da área experimental nas camadas de solo de 0 a 20 cm de profundidade, nos anos 2019 e 2020 em Londrina, PR.

| Área do experimento 2019 | | | | | | | | |
|--------------------------|-------------------|--|------|------|------|------|------|-------|
| mg/dm ³ | g/dm ³ | cmol _c /dm ³ de solo | | | | | | % |
| P | C | pH | Al | H+Al | Ca | Mg | K | V |
| 10,20 | 18,93 | 6,00 | 0,00 | 2,73 | 7,60 | 3,33 | 0,44 | 80,63 |
| Área do experimento 2020 | | | | | | | | |
| mg/dm ³ | g/dm ³ | cmol _c /dm ³ de solo | | | | | | % |
| P | C | pH | Al | H+Al | Ca | Mg | K | V |
| 10,46 | 18,80 | 5,43 | 0,03 | 3,18 | 5,19 | 2,00 | 0,30 | 70,23 |

P, Ca, Mg e K: Mehlich III; C: Espectrofotometria; pH: CaCl₂.

Cultivar, semeadura e delineamento experimental em 2019 e 2020

O híbrido de milho utilizado foi o Status Viptera 3 (Syngenta[®]), de ciclo precoce. O espaçamento entre linhas de plantio foi de 0,7 m, com 4 plantas por metro linear. A adubação utilizada foi de 414 kg ha⁻¹ da formulação 10-15-15 no momento da semeadura. O manejo da cultura foi realizado seguindo rigorosamente as recomendações agronômicas vigentes.

O delineamento experimental foi de blocos casualizados com dois tratamentos (irrigado e sequeiro) e quatro repetições. As semeaduras foram realizadas no dia 19 de março de 2019 e 20 de março de 2020.

Manejo de irrigação

Nos dois anos de experimentos foram conduzidos os manejos de sequeiro e irrigado. O manejo da irrigação foi baseado no Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), resultante do balanço hídrico climatológico. Quando a relação entre a ETR (Evapotranspiração real da cultura) e a ETP (Evapotranspiração potencial) estava inferior a 0,55 foi considerado limite de déficit hídrico na cultura, de acordo com a metodologia do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC). Por medida de segurança, quando a relação atingia 0,75 era realizada a irrigação até elevar a 1 novamente. O sistema de irrigação utilizado foi gotejamento, que após calibração proporcionou uma vazão de 6 mm h⁻¹.

Coleta de dados para calibração e validação do modelo em 2019

Nos tratamentos irrigado e sequeiro foram realizadas as mesmas amostragens, sendo o tratamento irrigado destinado para calibração do modelo, visto que esta deve ser realizada em condições ótimas (Hoogenboom et al., 2003; Jones et al., 2003). O tratamento de sequeiro serviu para validação neste mesmo ano.

Diariamente foi feito o acompanhamento fenológico da cultura, de acordo com Ritchie et al., (1993). Cada fase fenológica foi definida quando mais de 50% das plantas dentro das parcelas atingissem o mesmo estágio. A maturidade fisiológica foi definida por meio de coletas periódicas de espigas na parcela, até a identificação do ponto preto na ponta do grão.

As avaliações de área foliar foram realizadas nos estádios V4 (quatro folhas completas desenvolvidas), V8 (oito folhas completas desenvolvidas), V15 (quinze folhas completas desenvolvidas), R1 (embonecamento), R4 (grão pastoso) e R5 (grão dente), com o intuito de ter uma boa representação do desenvolvimento da cultura durante todo o ciclo. Foram coletadas quatro plantas (1m linear) aleatoriamente de cada repetição, obedecendo critérios de sempre deixar bordadura para as próximas coletas.

A estimativa da área foliar foi obtida pela soma do produto do máximo comprimento e largura de cada folha da planta, sendo feita a medição manualmente. Posteriormente esta soma foi multiplicada por 0,75 (fator de conversão) de acordo com McKee (1964), e dividindo-se a soma das áreas foliares (m^2), pela superfície que cada planta ocupava (m^2), obtendo-se o Índice de Área Foliar (IAF).

Após estas amostragens, as mesmas plantas foram destruídas e acondicionadas em sacos de papel, separando a espiga quando havia, retirados 50 grãos de cada espiga, para contabilizar o ganho de massa do grão por dia, que foram acondicionados separadamente. As amostras foram levadas para estufa à temperatura de 65 °C até atingir massa constante.

A colheita foi feita manualmente, sendo cada repetição representada por duas fileiras de 8 m cada. Após a debulha manual o rendimento foi corrigido para 13% de umidade. Para obtenção do número de grão por espiga, foram utilizadas

aleatoriamente 10 espigas de cada repetição para contagem. A massa de grãos foi definida através da separação de 4 grupos de 50 grãos de cada repetição e corrigida para 13% de umidade. Para obtenção dos valores de umidade para posterior adequação a umidade desejada, foi utilizado um equipamento eletrônico Gehaka Agri (modelo G800), calibrado para a cultura do milho.

Dados de coeficientes genéticos de calibração do modelo na safra 2019

Os dados de coeficientes genéticos para entrada no modelo foram obtidos de acordo com (HOOGENBOOM et al., 1994), em que:

- P1: duração do período vegetativo, que é a soma térmica da emergência até o final da etapa juvenil, (temperatura base 8°C);
- P2: sensibilidade ao fotoperíodo, sendo os dias de atraso na iniciação da floração masculina para cada hora do incremento do fotoperíodo acima de 12,5 horas;
- P5: duração do ciclo reprodutivo, sendo a soma térmica desde a emergência do estigma da espiga até a maturidade fisiológica do grão (temperatura base 8°C);
- G2: número máximo de grãos por planta;
- G3: taxa de enchimento de grãos (mg dia^{-1}) em condições ótimas de crescimento;
- PHY: Intervalo do filocrono em tempo térmico (graus-dia) entre a aparição das folhas sucessivamente.

Coleta de dados para validação do modelo na safra 2020

Este ano diferenciou-se das coletas de dados do ano 2019, sendo anotados os estádios de: Emergência, VT, R1, R3 e maturidade fisiológica.

A avaliação de área foliar foi realizada no estádio VT, sendo coletadas quatro plantas (1m linear) aleatoriamente de cada repetição, obedecendo critérios de sempre deixar bordadura para as próximas coletas.

A determinação da área foliar e procedimentos de colheita foram realizados de acordo com os critérios seguidos no ano 2019.

Análise estatística

Para fazer a comparação dos resultados observados e simulados, foi utilizado o programa estatístico R, sendo realizadas as seguintes análises:

1) Índice “d” de Concordância (WILLMOTT et al., 1985), sendo:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O_i|)^2} \right]$$

em que: N é número de observações, P_i o valor estimado, O_i o valor observado, $P'_i = P_i - M$ e $O'_i = O_i - M$, sendo valor de M a média observada.

O índice estatístico d, infere que quanto mais próximo da unidade, melhor a concordância entre duas variáveis comparadas ou o oposto.

2) O quadrado médio do erro (RMSE) foi realizado de acordo com Loague e Green (1991), sendo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} * \frac{100}{M}}$$

em que: P_i e O_i representa as variáveis estudadas, como índice de área foliar, acúmulo de matéria seca e rendimento de grãos.

A finalidade do valor de RMSE foi indicar a diferença, em porcentagem, entre os valores simulados e observados. Segundo Jamieson et al.(1991), a simulação é considerada excelente quando RMSE for menor que 10%, boa entre 10 e 20% e fraca quando maior que 30%.

3) Viés (V) que é o percentual de desvio sistemático do valor real, sendo:

$$Viés = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i}{n}$$

em que: Y_i = valor observado e \hat{Y}_i = valor estimado; n = número de observações.

4) Correlação de Pearson (R^2), os cálculos são utilizados segundo Hill et al. (2003), sendo:

$$r = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{var}(X)\text{var}(Y)}}$$

em que: $\text{cov}(X, Y)$ é a covariância entre X e Y , onde $\text{var}(X)$ e $\text{var}(Y)$ são as variâncias amostrais de X e Y .

Segundo Figueiredo Filho e Silva Junior (2009), os coeficientes de correlação de Pearson podem ser considerados:

$R = 1$: Perfeitamente positiva; $0,8 \leq R < 1$: Forte positiva; $0,5 \leq R < 0,8$: Moderada positiva; $0,1 \leq R < 0,5$: Fraca positiva; $0 \leq R < 0,1$: Íntima positiva e 0: Nula.

Resultados e Discussão

Os dois anos de ensaios avaliados apresentaram condições meteorológicas distintas (Figura 1). O volume de precipitação no período do ensaio em 2019 foi de 287 mm e em 2020 foi de 417 mm. A temperatura média do ar durante o ciclo da cultura em 2019 foi de 20,5 °C e 2020 de 19,6°C. E a radiação solar global média em 2019 foi de 14,9 MJ m⁻² d⁻¹ e 2020 de 16 MJ m⁻² d⁻¹.

As variações, entre os anos, podem ser atribuídas à dinâmica da circulação atmosférica, sendo comum na região norte a presença de períodos secos, além destes anos de estudos estarem sob influência da fase La Niña (Salton et al., 2021). Caldana et al., (2021) citam a importância agrônômica para a cultura do milho segunda safra, de analisar e planejar corretamente a época de semeadura, pois oscilações de chuvas vêm ocorrendo na região de Londrina no Estado do Paraná, devido à atuação de bloqueio atmosférico e massa de ar seco, que estão se tornando comuns nas épocas em que a cultura do milho segunda safra está em desenvolvimento.

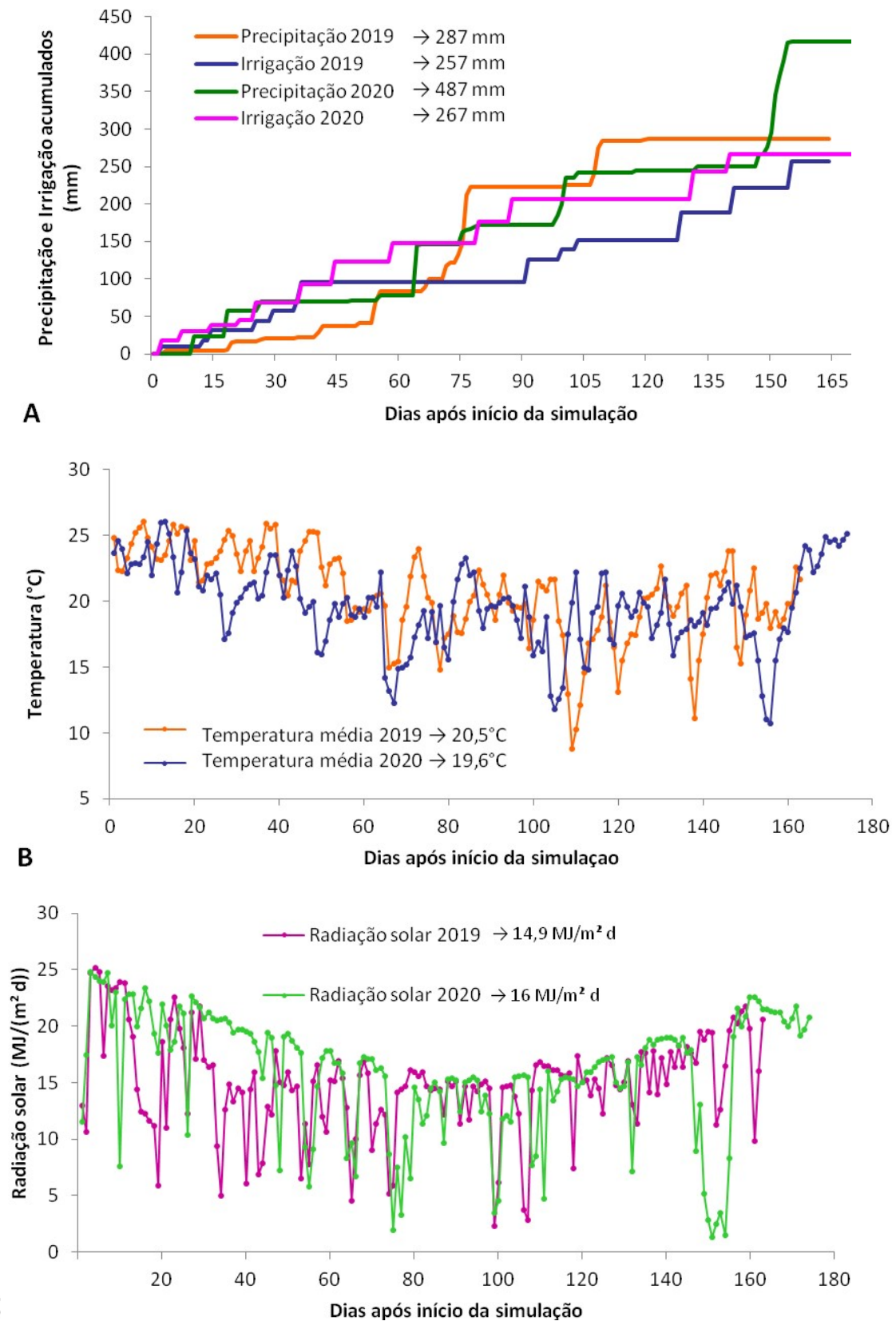


Figura 1. Precipitação e irrigação acumuladas (A), temperaturas médias diárias (B) e radiação solar global (C) ao longo do ciclo da cultura nos ensaios para calibração e validação do modelo nos anos 2019 e 2020, em Londrina, PR.

Calibração do modelo

Os coeficientes genéticos da cultivar (Tabela 2) foram calibrados de acordo com as observações de campo no ano de 2019 em condições ótimas (irrigado), e utilizados para validar a eficiência do modelo CERES-maize.

Tabela 2. Coeficientes genéticos da cultivar para calibração do modelo.

| P1 | P2 | P5 | G2 | G3 | PHINT |
|-----|-------|------|-------|------|-------|
| 280 | 0,020 | 1075 | 860,1 | 5,08 | 42 |

P1: °C d⁻¹; P2: °C d⁻¹; P5: °C d⁻¹; G2: Grãos por plantas; G3: Mg/dia por grão; PHINT: °C d⁻¹ por folhas consecutivas.

Trabalhos anteriores obtiveram coeficientes semelhantes aos do presente estudo, como Balderama et al. (2016) que obteve calibração de “P1” em 287 °C d⁻¹, coeficiente indicador da duração do período vegetativo até a antese. Hoogenboon et al. (2019) também encontrou valores “P2” de 0 a 0,4 d h⁻¹ referente a sensibilidade ao fotoperíodo, e de “G2” na ordem de 600 a 1000, que representa o número máximo de grãos por planta e “G3” de 5 a 12. Amaral et al. (2015) obteve para o híbrido AG5011 valor de 1048 °C d⁻¹ para o coeficiente “P5”, que é a soma térmica do período desde a emergência até a maturidade fisiológica. Valores aproximados de 5,76 e 5,60 de “G3” também foram obtidos, respectivamente, por Noriega-Navarrete et al. (2023) e Barbieri et al. (2020), sendo o coeficiente que determina a taxa de ganho de peso de grão diário. García-Montesinos et al. (2020) encontraram valor de “PHINT” de 42,60, valor semelhante ao encontrado, caracterizando a soma térmica para o aparecimento sucessivo de folhas subsequentes.

Além dos coeficientes de cultivar, foi necessário fazer ajustes no arquivo “SPE” (espécie) dos coeficientes genéticos, sendo: FSLFW (fração de área foliar que senesce quando ocorre déficit hídrico) de 0,050 para 0,250. RSGRT (número de dias consecutivos que a taxa relativa de crescimento do grão está abaixo do necessário, desencadeando a maturidade fisiológica antecipada) de 5,0 para 30,0. CARBOT (número consecutivo de dias que a planta passa por período crítico por excesso de temperatura, déficit hídrico ou déficit de nitrogênio) de 7,0 para 30,0. Pois quando a planta foi submetida a estresse hídrico prolongado, o

modelo estava antecipando a maturidade fisiológica de grãos e o aumento da perda de área foliar por requeima estava baixo do ideal. Esta mesma situação foi relatada por Song e Jin (2020), que notaram quando o experimento era irrigado que o modelo oferecia bom desempenho, mas quando em regime de sequeiro não gerava resultado real, sendo necessário fazer ajustes nestes parâmetros para obter uma boa simulação.

Pinheiro et al. (2021), também relataram a importância da validação dos modelos, porém cabíveis de ajustes, devido a distinção dos fatores ambientais existentes em diferentes localidades. Para Pereira et al. (2010), o modelo foi eficiente para condições de fenologia e produtividade de grãos em condições ótimas (irrigado), porém no cultivo de sequeiro precisa de ajustes para condições tropicais, devido ao déficit hídrico afetar a eficiência na simulação dos componentes de rendimento e produtividade de grãos.

A produtividade, massa seca da parte aérea e fenologia (Tabela 3), mostram os valores observados e simulados, que serviu para calibração do modelo.

Tabela 3. Fenologia, produtividade de grãos, massa seca da parte aérea e índice de área foliar observados e simulados no ensaio de calibração (irrigado) do modelo em 2019, em Londrina, PR.

| Fenologia | | | | | |
|---------------------------|----------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------|
| Data da antese | | | Data maturidade fisiológica | | |
| Observado | Simulado | | Observado | Simulado | |
| Dias após semeadura (DAS) | | | | | |
| 65 | 69 | | 163 | 163 | |
| Produtividade de grãos | | Massa seca da parte aérea | | Índice de área foliar | |
| Observado | Simulado | Observado | Simulado | Observado | Simulado |
| kg ha ⁻¹ | | kg ha ⁻¹ | | m ² m ⁻² | |
| 6.828 | 8.112 | 11.982 | 14.043 | 3,99 | 3,41 |

Conforme observado na Tabela 3, o modelo tendeu a superestimar a data de antese, 65 DAS observado e 69 DAS simulado. Na maturidade fisiológica o modelo obteve excelente precisão com valores observado e simulado de 163 DAS.

A produtividade de grãos foi superestimada com 6.828 kg ha⁻¹ observada e 8.112 kg ha⁻¹ simulada da mesma forma a massa seca da parte aérea

com 11.982 kg ha⁻¹ observada e 14.043 kg ha⁻¹ simulada.

Já o índice de área foliar foi subestimado com valores de 3,99 m² m⁻² e observado 3,41 m² m⁻² simulado.

Com esta calibração foi possível posteriormente validar o modelo no mesmo ano de 2019 na condição de sequeiro e no ano de 2020 nas condições de sequeiro e irrigado.

Validação do modelo

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de 2019 e 2020 da validação do modelo, quanto à fenologia das plantas, quantificando os dias após semeadura até a antese e maturidade fisiológica.

Tabela 4. Número de dias da semeadura até a antese e da maturidade fisiológica, valores observados e simulados para o ensaio de validação do modelo em 2019 e 2020, em Londrina, PR.

| 2019 | | | | | | | |
|---------------------------|----------|------------------------|----------|--|----------|------------------------|----------|
| Data da antese – Sequeiro | | | | Data maturidade fisiológica - Sequeiro | | | |
| Observado | | Simulado | | Observado | | Simulado | |
| Dias após semeadura (DAS) | | | | | | | |
| 66 | | 69 | | 158 | | 163 | |
| 2020 | | | | | | | |
| Data da antese | | Data maturidade | | Data da antese | | Data maturidade | |
| Irrigado | | fisiológica - Irrigado | | Sequeiro | | fisiológica - Sequeiro | |
| Observado | Simulado | Observado | Simulado | Observado | Simulado | Observado | Simulado |
| Dias após semeadura (DAS) | | | | | | | |
| 81 | 80 | 183 | 173 | 86 | 80 | 183 | 173 |

No ano 2019 o modelo tendeu a superestimar a data de antese e maturidade fisiológica, sendo observado 66 e simulado 69 DAS para data de antese. A maturidade fisiológica observada foi 158 e simulado 163 DAS.

A data de antese em 2020 no ensaio irrigado, o modelo subestimou a data de antese em um dia, sendo observado 81 e simulado 80 DAS. Em sequeiro houve novamente a subestimação, sendo observado 86 e simulado 80 DAS.

A maturidade fisiológica em 2020, tanto em condições irrigado e sequeiro, ocorreu subestimação, em condições irrigadas o valor observado foi de 183 e simulado 173 DAS. E nas condições de sequeiro o valor observado foi de 183 e simulado 173 DAS.

Verifica-se que houve significativa redução de ciclo em 2019 comparado a 2020. Segundo García-Montesinos et al. (2020), além do incremento na produtividade, a redução de ciclo ocorre devido às plantas serem submetidas a menor deficiência hídrica e conseqüentemente redução no suprimento de nitrogênio à planta.

A Figura 2 apresenta os resultados observados e simulados de produtividade de grãos, referentes a validação do modelo no ano 2019 e 2020.

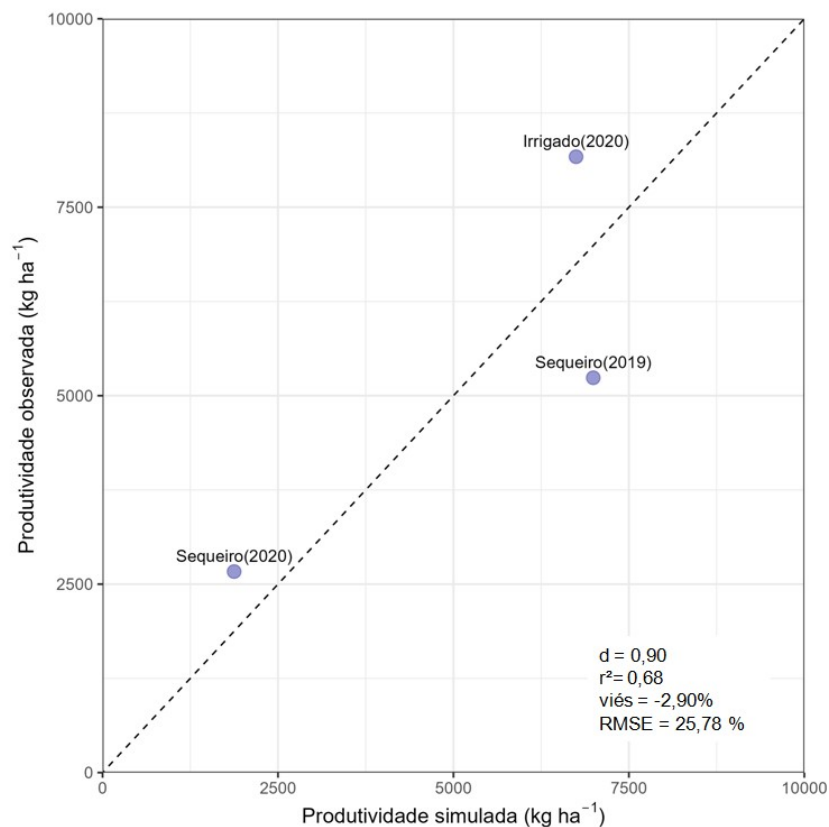


Figura 2. Produtividades de grãos observada e simulada, sistema sequeiro e irrigado. Validação do modelo ano 2019 e 2020, em Londrina, PR.

A produtividade média observada em 2019 em condição de sequeiro foi de 5.238 e simulada de 6.992 kg ha⁻¹. Em 2020 os valores em sequeiro foram, observado 2.667 e simulado 1.875 kg ha⁻¹, sendo bastante inferior ao tratamento

irrigado que apresentou valor observado 8.170 e simulado 6.747 kg ha⁻¹. Para eficiência do modelo, observou-se que o valor de RMSE foi de 25,48%, sendo considerada uma simulação válida. O valor de viés foi de 2,90%, que indica que o modelo superestimou o valor observado, porém em níveis ótimos. A correlação foi de 0,68, considerada moderada e válida para a comparação. E índice de concordância “d”, de 0,90 que indica uma ótima concordância entre as variáveis.

Resultados semelhantes de divergências entre RMSE e “d” também foram notados por Amaral et al., (2015), que encontraram tais diferenças com comparação de ensaios de sequeiro e irrigado. Simulando o desempenho de produtividade do milho segunda safra, Soler (2004), também obteve valores de RMSE de 24% em simulação com o híbrido AG 9010, que foram consideradas simulações de boa qualidade, corroborando com os dados do presente trabalho.

Resultados de produtividades de grãos semelhantes ao presente trabalho, foi encontrado por Barbieri et al. (2020), com 6.603 kg ha⁻¹ do híbrido DKB 390 no Estado do Mato Grosso do Sul em eventos de El niño. Kipkulei et al. (2022) também encontraram produtividades semelhantes ao experimento de sequeiro cuja produtividade foi de 5.273 kg ha⁻¹ ao avaliar a eficiência do modelo CERES-maize no Quênia. Resultado semelhante da condição de irrigado foi obtido por Rugira et al. (2021) de 8.495 kg ha⁻¹ em experimentos irrigados no norte da China. Amaral et al. (2015) encontrou produtividade com índice estatístico “d” de 0,96, ao qual atribuiu alta concordância na simulação de produção de milho, corroborando com os resultados deste trabalho. Desta forma, a simulação de produtividade de grãos foi eficiente na validação em condição irrigada e sequeiro nos dois anos.

Com relação à massa seca da parte aérea coletada no ano 2019, o resultado da validação (Figura 3) mostra valor observado de 10.934 e simulado 12.896 kg ha⁻¹.

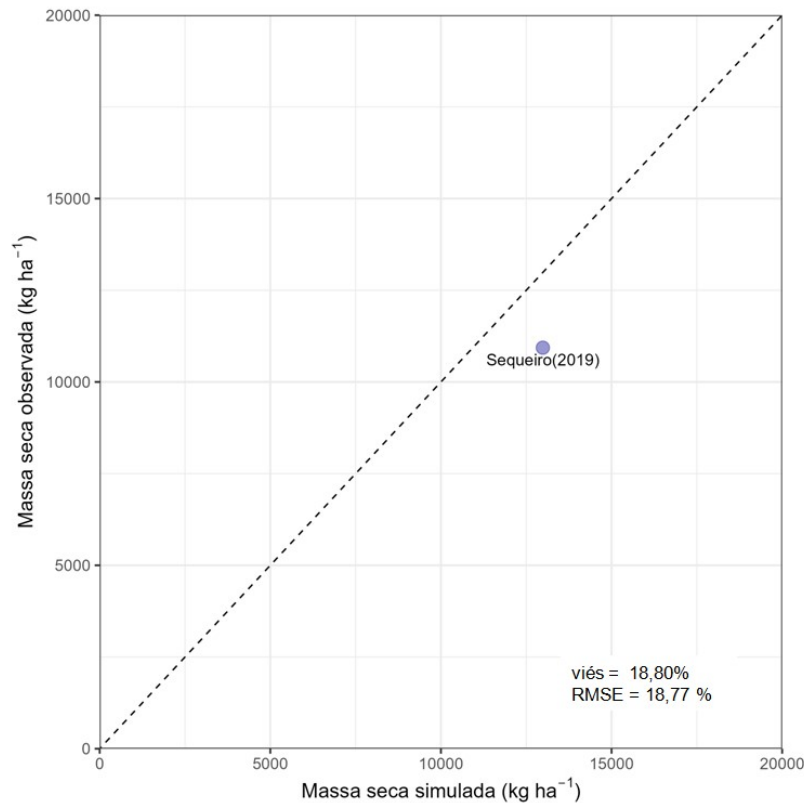


Figura 3. Massa seca da parte aérea simulada e observada, nos sistema de sequeiro em Londrina, PR. Validação ano 2019.

A análise estatística mostra que o valor RMSE na simulação foi de 18,77%, sendo considerada de boa qualidade. Valor de viés de 17,80% mostra que o modelo superestimou, porém em bom nível. Amaral et al. (2015) obteve valores semelhantes de massa seca da parte aérea e embora em níveis considerados bons de simulação, houve a superestimação dos valores simulados, e valor de RMSE de 39,7%. Níveis de variação de biomassa total variando de 624 a 1.974 kg ha⁻¹ foram obtidos em simulações na China por Rugira et al. (2021), e foram considerados resultados satisfatórios. A variação máxima ocorrida no presente ensaio irrigado foi de 1.962 kg ha⁻¹.

Os índices de área foliar máximo (Figura 4) em 2019 em condição de sequeiro obteve valor observado de 3,60 e simulado 3,40 m² m⁻². No ano 2020 na condição irrigada o valor observado foi de 3,86 e simulado 2,88 m² m⁻², e em sequeiro foi observado 1,87 e simulado 2,18 m² m⁻², sendo muito inferiores às condições de irrigado 2020 e sequeiro 2019.

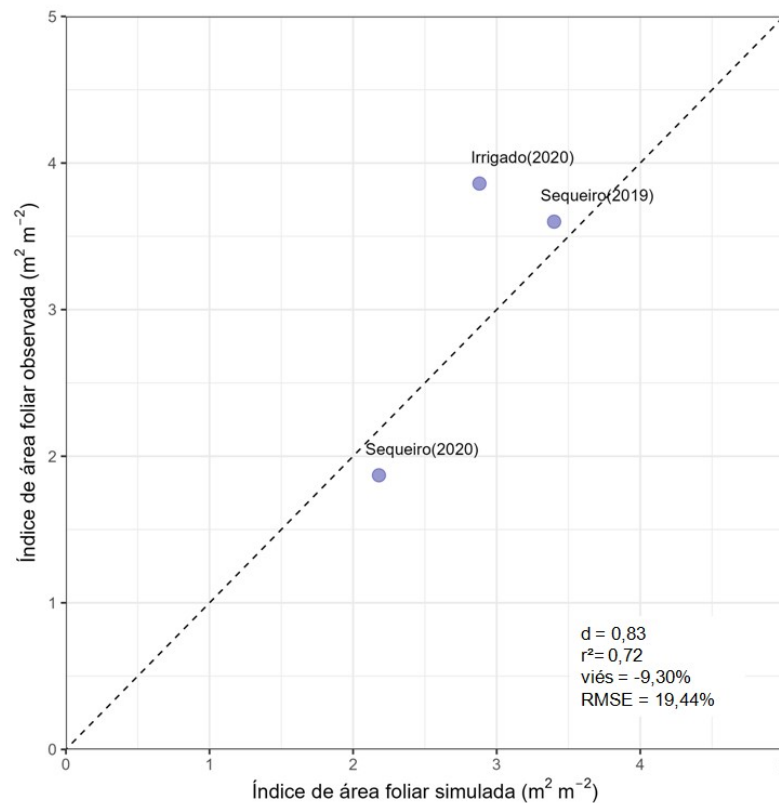


Figura 4. Índice de área foliar simulado e observado, no sistema sequeiro e irrigado em Londrina, PR. Validação ano 2019 e 2020.

A simulação foi considerada de boa qualidade, com RMSE de 19,44%, valor de viés de -9,30% demonstrou pouca superestimação, correlação fortemente positiva e “d” de concordância 0,83, que demonstra boa relação entre as variáveis.

Desta forma, observando os dois anos avaliados, percebe-se redução na produtividade e área foliar no ano 2020 no sistema de sequeiro, devido às condições meteorológicas mais severas, com maiores períodos de déficit hídrico, radiação solar global e menor índice pluviométrico na fase crítica de pendoamento, como foi visto sobre as condições meteorológicas do ano em estudo. Na condição irrigada, obteve-se maiores produtividades devido a maior radiação solar global, maiores períodos ótimos de temperatura, que somando com suprimento hídrico, resultou em maior produtividade.

Miranda et al. (2021), na segunda safra de 2020 obtiveram também redução na produtividade de grãos de milho, comparado ao ano de 2019 devido a deficiência hídrica ocorrer de forma irregular e associada às fases críticas da cultura.

Conclusão

A produtividade de grãos, massa seca da parte aérea, área foliar e fenologia observadas, são aceitáveis de acordo com a literatura e estatísticas com os resultados simulados pelo modelo estudado nas condições irrigado e sequeiro, em dois anos em Londrina, PR.

O modelo CERES-maize da plataforma DSSAT devidamente calibrado para as condições locais é uma ferramenta eficiente para simular cenários em diferentes condições hídricas e meteorológicas.

- Amaral, T. A., de Lima, A. C. R., de Andrade, C. D. L. T., Silva, S. D. D. A. E. (2015). Parametrização e avaliação do modelo CSM-CERES-MAIZE para cultivares de milho recomendadas microrregião de Pelotas, RS. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 14(3), 371-391. DOI: <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v14n3p371-391>
- Balderama, O., Alejo, L., & Tongson, E. (2016). Calibration, validation and application of CERES-Maize model for climate change impact assessment in Abuan Watershed, Isabela, Philippines. *Climate, Disaster and Development Journal*, 2(1), 11-20. DOI: <https://doi.org/10.18783/cddj.v002.i01.a02>
- Barbieri, J. D., Dallacort, R., De Freitas, P. S. L., Tieppo, R. C., da Silva Andrea, M. C., Junior, S. S. (2020). Produtividade da soja e milho safrinha simulada para os eventos ENOS em diferentes épocas de semeadura no estado de Mato Grosso. *Acta Iguazu*, 9(1), 45-66. DOI: <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v9i1.21600>
- Bhering, S. B., Santos, H. G. dos. (2008). Mapa de solos do Paraná: legenda atualizada. Embrapa Solos. 74 p. http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Aparana_solos_20201105#momo
- Boote, K. J., Jones, J. W., Pickering, N. B. (1996). Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy journal*, 88(5), 704-716. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050005x>
- Bortolon, E. S. O., Bortolon, L., Leite, L. F. C., Junior, A. L. (2019). Novas abordagens, tendências e oportunidades no uso de modelos de simulação para a avaliação de sistemas agrícolas em regiões tropicais. *Revista de Ciências Agrárias*, 42(4), 874-883. DOI: <https://doi.org/10.19084/rca.15756>
- Caldana, N. F. S., Firmino, T., Júnior, W. A. R., Ferreira, L. G. B., & de Aguiar, M. A. (2022). Análise da Precipitação e de Veranico no Estado do Paraná, Brasil—Estudo de Caso do Mês de Abril de 2021. *Revista Brasileira de Climatologia*, 31, 49-72. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15304>
- Embrapa. (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília. 353p.
- Faria de, R. T., Caramori, P. H. (1986). Caracterização físico-hídrica de um Latossolo roxo distrófico do município de Londrina, PR. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 21(12), 1303-1311.
- Figueiredo Filho, D. B., Silva Júnior, J. A. (2009). Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, 18(1), 115-146. Disponível em: http://dirin.s3.amazonaws.com/drive_materias/1666287394.pdf
- Garbuglio, D. D., Gerage, A., Araújo, P., Bianco, R., Custódio, A. (2021). Avaliação estadual de cultivares de milho segunda safra 2020. IDR-Paraná. <https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/BT100-Avaliacao-estadual-de-cultivares-de-milho-segunda-safra-2020>.

García-Montesinos, L. E., Fernández-Reynoso, D. S., Rubio-Granados, E., Martínez-Menez, M. R., Tijerina-Chávez, L. (2020). Maize (*Zea mays* L.) yields in southern Mexico calculated by the Decision Support System for Agrotechnology Transfer. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 859-870. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.751>.

González, O. R., Bacallao, R. F., Córdova, N. H., Carreño, F. S., Mompié, E. I. J., Viera, D. G., Montenegro, R. J. V. (2021). Simulación de estrategias de manejo a partir del modelo DSSAT para incrementar los rendimientos de un cultivar de maíz. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 55(2). Disponible em: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2079-34802021000200008

Hill, P. C., Griffiths, W. E., Judge, G. G. (2003). *Econometria*. 2.ed. Saraiva. 471p.

Hoogenboom, G., C. H. Porter, V., Shelia, K. J., Boote, U.; Singh, J. W., White, L. A., Hunt, R., Ogoshi, J. I., Lizaso, J., Koo, S., Asseng, A., Singels, L. P., Moreno, W., Jones, J. W. (2017). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7. DSSAT Foundation, Gainesville. <https://DSSAT.net>

Hoogenboom, G., C. H., Porter, K. J., Boote, V., Shelia, P. W., Wilkens, U., Singh, J. W., White, S., Asseng, J. I., Lizaso, L. P., Moreno, W., Pavan, R., Ogoshi, L. A., Hunt, G. Y., Tsuji, J. W., Jones, J. W. (2019). The DSSAT crop modeling ecosystem: Advances in Crop Modeling for a Sustainable Agriculture. Burleigh Dodds Science Publishing. 173-174. DOI: <https://doi.org/10.19103/as.2019.0061.10>

Hoogenboom, G., Jones, J. W., Wilkens, P. W., Porter, C. H., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Boote, K. J., Singh, U., Uryaseva, O., Bowen, W. T., Gijsman, A. J., Du toit, A. S., White, J. W., Tsuji, G. Y. (2003). Decision support system for agrotechnology transfer: version 4.0 (compact disc). Honolulu: University of Hawaii.

Jamieson, P. D., Porter, J. R., & Wilson, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field crops research*, 27(4), 337-350. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U.; Gijsman, A. J., Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European journal of agronomy*, 18, (3-4), 235-265.

Junior, I. M. F., da Silva, E. H. F. M., Rosa, J. M., & Marin, F. R. (2020). Assessing cloudiness effect on soybean yield in the Southeast Brazil. *Agrometeoros*, 27(1). DOI: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v27i1.26598>

Kipkulei, H. K., Bellingrath-Kimura, S. D., Lana, M., Ghazaryan, G., Baatz, R., Boitt, M., ... & Sieber, S. (2022). Assessment of Maize Yield Response to Agricultural Management Strategies Using the DSSAT–CERES-Maize Model in Trans Nzoia County in Kenya. *International Journal of Plant Production*, 1-21. Disponible em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42106-022-00220-5>

Loague, K., & Green, R. E. (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of contaminant hydrology*, 7(1-2), 51-73. DOI: [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(91\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0169-7722(91)90038-3)

McKee, G. W. (1964). A coefficient for computing leaf area in hybrid corn 1. *Agronomy Journal*, 56(2), 240-241. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1964.00021962005600020038x>

Miranda, G. V., Braun, E. M. W., Alves, M. E. V. B., Machado, P., Ramos, A. M. (2021). Desempenho de híbridos de milho em diferentes épocas de semeadura na segunda safra em baixa altitude no extremo Oeste do Estado do Paraná. *Brazilian Journal of Development*, 7(4), 34794-34810. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-100>

Moraes, M. T., Debiasi, H., Franchini, J. C. (2018). Modelagem da dinâmica da água em sistemas de preparo de um Latossolo vermelho. *Revista Scientia Agrária*. 19(1), 142-152.

Navarrete, J. L. N., Moreno, R. S., Burgueño-Ferreira, J. A., Dhliwayo, T., Cruz, I. L., Petroli, C. D. (2023). Estimation of maize genetic coefficients for the CERES-maize model using non-destructive methods. *Agrociencia*. DOI: <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i2.2505>

Nitsche, P. R., Caramori, P. H., Ricce, W. E. S., Pinto, L. F. D. (2019). Atlas climático do Estado do Paraná. IAPAR. <https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Atlas-Climatico>

Pavinato, P. S., Pauletti, V., Motta, A. C. V., Moreira, A. (2017). Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná.

Pereira, A. M. D. A. R., Von Pinho, R. G., Paglis, C. M., Pereira, J. L. D. A. R., & Altoé, T. F. (2010). Eficiência do modelo Ceres-Maize na simulação do desempenho de híbridos de milho. *Revista Ceres*, 57, 486-493. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000400008>

Perondi, D., Fraise, C. W., Staub, C. G., Cerbaro, V. A., Barreto, D. D., Pequeno, D. N., Pavan, W. (2019). Crop season planning tool: Adjusting sowing decisions to reduce the risk of extreme weather events. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 62-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.013>

Pinheiro, A. G., Souza, L., Jardim, A., Araújo Júnior, G. D. N., Alves, C., Souza, C., Silva, T. (2021). Importância dos modelos de simulação de culturas diante os impactos das alterações climáticas sobre a produção agrícola-Revisão. *Rev Bras Geo Fís*, 14(6), 3648-3666. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.6.p3648-3666>

Ritchie, S. W., Hanway, J. J.; Benson, G. O. (1993). How a corn plant develops. *Special Bulletin, Iowa*, 48. Disponível em: <http://publications.iowa.gov/18027/1/How%20a%20corn%20plant%20develops001.pdf>

Rugira, P., Ma, J., Zheng, L., Wu, C., & Liu, E. (2021). Application of DSSAT CERES-maize to identify the optimum irrigation management and sowing dates on improving maize yield in Northern China. *Agronomy*, 11(04), 674. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040674>

Salton, F. G., Morais, H., & Lohmann, M. (2021). Períodos secos no estado do Paraná. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36, 295-303. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863620163>

Song, L., & Jin, J. (2020). Improving CERES-Maize for simulating maize growth and yield under water stress conditions. *European Journal of Agronomy*, 117, 126072. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126072>

Tojo Soler, C. M. (2004). Uso do modelo Ceres-Maize para previsão de safra do milho safrinha (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-09112004-164934/en.php>

Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., Rowe, C. M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C5), 8995-9005. DOI: <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>

5 ARTIGO B – AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO MODELO CERES-MAIZE PARA PREVISÃO DE PRODUTIVIDADE E FENOLOGIA DO MILHO SEGUNDA SAFRA SEQUEIRO E IRRIGADO NO TERCEIRO PLANALTO DO ESTADO DO PARANÁ

RESUMO

O Terceiro Planalto Paranaense se destaca por ser a principal e maior região produtora de milho segunda safra do Estado. A modelagem tem sido utilizada como ferramenta auxiliar na estimativa do impacto do déficit hídrico na produtividade de milho em um local ou região. O objetivo deste estudo foi validar a produtividade, fenologia e redução do potencial produtivo causado pelo déficit hídrico, utilizando o modelo CERES-maize e o híbrido de milho Status, em quatro municípios da macrorregião do Terceiro Planalto Paranaense. Os ensaios de campo para obtenção das variáveis de entrada no modelo foram conduzidos em 2019 e 2020 na Estação Experimental do Centro Universitário Filadélfia – Unifil, Campus Palhano em Londrina, PR. Com os resultados foi calibrado e validado o modelo CERES-maize da plataforma DSSAT. A seguir foi testada a eficiência do modelo para outros três municípios que representam a macrorregião do Terceiro Planalto Paranaense: Cambará, Campo Mourão e Santa Tereza do Oeste. O modelo teve boa eficiência ao simular a fenologia da cultura, sendo Campo Mourão o município com maior ciclo, devido às menores temperaturas e Cambará com o menor ciclo devido às temperaturas mais altas e menor pluviosidade. As produtividades médias observadas e simuladas foram: Londrina 2.667 e 1.875 kg ha⁻¹, Cambará 5.691 e 3.151 kg ha⁻¹, Campo Mourão 6.471 e 5.521 kg ha⁻¹ e Santa Tereza do Oeste 8.316 e 6.969 kg ha⁻¹, respectivamente. Londrina apresentou o maior impacto negativo sobre a produtividade causada pelo déficit hídrico, com 75% de perda, seguido por Cambará com 58%, Campo Mourão 11% e Santa Tereza do Oeste 4%. O modelo CERES-maize teve boa performance, sendo possível quantificar diferentes respostas do híbrido de milho na macrorregião em estudo. Com o uso do modelo é possível também quantificar o impacto do déficit hídrico na produtividade do milho segunda safra, mostrando que a região norte do Estado apresenta grande potencial de resposta a irrigação.

Palavra-chave: Modelagem, Irrigação, Safrinha, *Zea mays* L.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE CERES-MAIZE MODEL FOR FORECASTING PRODUCTIVITY AND PHENOLOGY OF SECOND HARVEST RAINFED AND IRRIGATED CORN IN THE THIRD PLATEAU OF THE STATE OF PARANÁ, BRAZIL

The Third Plateau of Paraná stands out for being the main and largest second-season corn producing region in the State. Modeling has been used as an auxiliary tool in estimating the impact of water deficit on corn productivity in a location or region. The objective of this study was to validate productivity, phenology and reduction in productive potential caused by water deficit, using the CERES-maize model and the Status corn hybrid, in four municipalities in the macro-region of the Third Plateau of Paraná. Field trials to obtain the input variables in the model were conducted in 2019 and 2020 at the Experimental Station of Centro Universitário Philadelphia – Unifil, Campus Palhano in Londrina, PR. With the results, the CERES-maize model of the DSSAT platform was calibrated and validated. Next, the efficiency of the model was tested for three other municipalities that represent the macro-region of the Third Plateau of Paraná: Cambará, Campo Mourão and Santa Tereza do Oeste. The model had good efficiency when simulating the phenology of the crop, with Campo Mourão being the municipality with the longest cycle, due to lower temperatures and Cambará with the shortest cycle due to higher temperatures and less rainfall. The observed and simulated average yields were: Londrina 2,667 and 1,875 kg ha⁻¹, Cambará 5,691 and 3,151 kg ha⁻¹, Campo Mourão 6,471 and 5,521 kg ha⁻¹ and Santa Tereza do Oeste 8,316 and 6,969 kg ha⁻¹, respectively. Londrina had the greatest negative impact on productivity caused by the water deficit, with 75% loss, followed by Cambará with 58%, Campo Mourão 11% and Santa Tereza do Oeste 4%. The CERES-maize model had good performance, making it possible to quantify different responses of the maize hybrid in the macro-region under study. Using this model, it is also possible to quantify the impact of water deficit on second-season corn productivity, showing that the northern region of the state has great potential for responding to irrigation.

Keyword: Modeling, Irrigation, Safrinha, *Zea mays* L.

Introdução

A produção de milho no Brasil e no Estado do Paraná tem como principal época de semeadura a segunda safra, período no qual grande parte das regiões produtoras do Estado possui clima adequado à cultura. Segundo a Conab no último ano/safra 2022/23 das 125.536 mil toneladas produzidas, 77,6 % foram na segunda safra. O Estado do Paraná é responsável por 18.852 mil toneladas, representando 15% da produção nacional, sendo o Terceiro Planalto Paranaense a maior região produtora de milho segunda safra do Estado, devido as suas condições edafoclimáticas favorecerem o bom desempenho da cultura (Deral, 2023).

O déficit hídrico é um dos principais fatores que afetam a produtividade do milho segunda safra. O uso da modelagem pode contribuir para mensurar perdas de híbridos de milho em uma determinada região por este tipo de adversidade. A região do presente estudo possui como principal característica sua localização em área de transição climática, o que torna as condições de precipitações muitas vezes irregulares (Pereira et al., 2008).

Entre os fatores determinantes da produtividade se destaca a radiação solar, que quando insuficiente causará perdas na produtividade (Monteiro et al., 2019). A disponibilidade hídrica para a cultura é importante para o desenvolvimento fisiológico (Msowoya, et al. 2016), sendo o déficit hídrico responsável pela redução da expansão de área foliar e redução na interceptação da radiação solar, absorção de água e nutrientes, e conseqüentemente redução de produtividade (Aparecido et al., 2020). A temperatura mínima é a variável térmica que mais contribui para a redução da produtividade (Caron et al., 2017). Além de limitar a produtividade, as baixas temperaturas causam geadas em regiões mais frias, podendo causar perdas parciais e até totais da área foliar das plantas (Perissato et al., 2013). Temperaturas altas encurtam o período de enchimento de grãos e diminuem o ciclo da planta, reduzindo a produção potencial (Teixeira et al., 2020).

Para facilitar a quantificação dos efeitos das variações climáticas em diferentes regiões e o comportamento dos materiais genéticos, os modelos de previsão de safra são ferramentas adequadas para direcionar o foco de pesquisa e tomadas de decisão (Andrade et al., 2020). Com as informações de clima, solo, fenologia e manejo é possível conhecer a dinâmica biológica e ambiental do

comportamento de uma cultivar em um local específico (García-Montesinos et al., 2020). Os modelos de simulação de cultivos se transformaram em ferramentas poderosas para identificar estratégias de utilização plena de recursos naturais escassos, sob condições climáticas variáveis (Perondi et al., 2019).

De maneira geral, quanto mais afastada do inverno for realizada a semeadura, maior será a produtividade (Melo et al., 2021). Estudo de modelagem e simulação de semeaduras mais tardias, evidenciaram relações significativas de diminuição de produtividade (Aparecido et al., 2020). Quanto mais severas as condições climáticas, tanto de redução de temperatura mínima, como de suprimento hídrico e de fotoperíodo, maior a queda de produtividade, uma vez que plantios mais tardios passam por estas condições no período do inverno.

A modelagem é uma ferramenta importante na simulação do rendimento de híbridos calibrados em uma localidade, sendo possível simular o efeito das diferentes variações climáticas em outros locais e identificar o quanto o déficit hídrico contribui para redução da produtividade do milho segunda safra.

O objetivo deste estudo foi validar a produtividade, fenologia e mensurar a redução do potencial produtivo causado por déficit hídrico, e consequentemente as regiões com maior necessidade de irrigação, utilizando o modelo CERES-maize com o híbrido de milho Status, para quatro municípios que compreendem a macrorregião do Terceiro Planalto Paranaense.

Material e Métodos

Os ensaios de campo foram conduzidos, respectivamente, em 2019 e 2020 na Estação Experimental do Centro Universitário Filadélfia – Unifil, Campus Palhano em Londrina, PR, ($23^{\circ}36'18''$ S, $51^{\circ}20'01''$ W e altitude 514 metros). Com os resultados coletados foi calibrado e validado o modelo CERES-maize da plataforma DSSAT v.4.7.5 (Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2017; Hoogenboom et al., 2019), seguindo as orientações de parametrização de Hoogenbomm et al. (2003) e Jones et al. (2003).

Com o modelo calibrado e validado para Londrina, os outros três municípios utilizados para completar a representação da macrorregião do Terceiro Planalto Paranaense (Figura 1) e testar a eficiência do modelo DSSAT nos municípios de Cambará, Campo Mourão e Santa Tereza do Oeste. Os resultados observados de produtividade e fenologia foram provenientes da rede de experimentos de milho segunda safra do IDR-Paraná (Garbuglio et al., 2021).

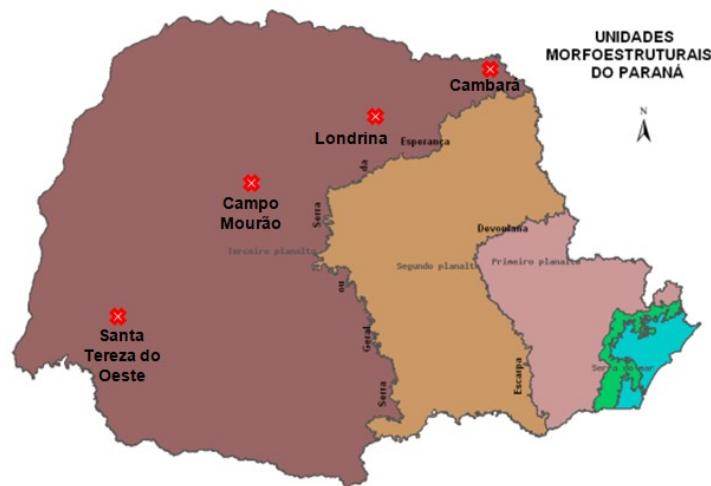


Figura 1. Divisões dos planaltos Paranaenses, com a localização de Cambará, Londrina, Campo Mourão e Santa Tereza do Oeste no Terceiro Planalto Paranaense. Adaptado de MINEROPAR (2010).

Os dados observados dos quatro municípios para as simulações foram todos obtidos em condições de sequeiro, no ano de 2020, e conseqüentemente, utilizou-se o modelo DSSAT para simular a mesma condição de

sequeiro e também irrigada, para identificar o quanto cada município teve de redução de produtividade devido ao efeito causado pelo déficit hídrico.

Caracterização do solo

O solo dos quatro municípios foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico (EMBRAPA, 2013), de textura argilosa, de acordo com o mapa de solos de Bhering e Santos, (2008).

Os dados físico-hídricos de solo foram obtidos de Faria e Caramori (1986) e Moraes, Debiasi e Franchini (2018).

Dados climáticos

O clima dos municípios em estudo foi classificado, segundo Köppen, como subtropical úmido (Cfa). As condições climáticas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Médias climáticas e altitude dos municípios de Cambará, Londrina, Campo Mourão e Santa Tereza do Oeste. Adaptado de Atlas Climático do Estado do Paraná (NITSCHE et al., 2019).

| Municípios: | Precipitação anual (mm) | Temperatura média anual (°C) | Altitude (m) |
|-----------------------|-------------------------|------------------------------|--------------|
| Cambará | 1.200 – 1.400 | 21,1 – 22 | 475 |
| Londrina | 1.600 – 1.800 | 21,1 – 22 | 615 |
| Campo Mourão | 1.600 – 1.800 | 17,1 – 18 | 625 |
| Santa Tereza do Oeste | 1.800 – 2.000 | 15,1 – 16 | 668 |

Os dados meteorológicos diários de precipitação, temperaturas mínimas e máximas do ar e radiação solar global, foram mensurados com uma estação meteorológica automática completa, localizada em cada município que foi realizado os ensaios, pertencentes ao IDR-Paraná.

Cultivar, semeadura e manejo dos ensaios

O híbrido utilizado foi o Status Viptera 3 (Syngenta®) de ciclo precoce. O manejo da cultura foi realizado rigorosamente de acordo com as recomendações agronômicas vigentes.

Na Tabela 2 encontra-se a população de plantas e datas de semeadura.

Tabela 2. Datas de semeadura e população de plantas (ha) nos quatro ensaios.

| Municípios: | Data de semeadura | População de plantas (ha) |
|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| Cambará | 12/03/2020 | 52.900 |
| Londrina | 20/03/2020 | 57.000 |
| Campo Mourão | 27/02/2020 | 58.300 |
| Santa Tereza do Oeste | 21/02/2020 | 57.900 |

Simulação de irrigação e balanço hídrico

Os valores de ISNA são resultantes da relação entre ETR (Evapotranspiração da cultura) e ETP (Evapotranspiração potencial) (ETR/ETP), variando de 0 a 1, se não há restrições à evapotranspiração, ETR = ETP e ISNA = 1. Quando o ISNA se aproxima de zero, ocorre déficit hídrico severo, pois a planta deixa de transpirar devido à falta de água no solo. Assim, o ISNA indica se a planta está suprida ou não por água de acordo com a demanda da cultura (FARIAS et al., 2001).

A simulação da irrigação foi baseada nos valores de ISNA resultantes do balanço hídrico. Quando a relação entre a ETR e a ETP atingiu 0,55 considerou-se que a cultura começou a sofrer déficit hídrico, de acordo com a metodologia do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC). Por medida de segurança, quando a relação estava em 0,75, foi simulada a irrigação até elevar a 1 novamente, para que a planta permanecesse totalmente suprida de água. As lâminas de água foram inseridas no modelo CERES-maize para simular o manejo irrigado.

O mesmo balanço hídrico utilizado para simular as irrigações, foi utilizado para demonstrar o quanto cada município foi exposto ao déficit hídrico que conseqüentemente resultou em perda de produtividade. O balanço hídrico utilizado foi o sequencial decendial de Thornthwaite e Mather (1955), em planilha no ambiente EXCEL™, conforme Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998).

Análise estatística

A comparação dos resultados observados e simulados de produtividade e fenologia foi realizada com o programa estatístico R, por meio das seguintes análises:

1) Índice “d” de Concordância (WILLMOTT et al., 1985), sendo:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O})^2 + \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right]$$

em que: N é número de observações, P_i o valor estimado, O_i o valor observado, P̄ = P_i-M e Ō = O_i-M, sendo valor de M a média observada.

O índice estatístico d, infere que quanto mais próximo da unidade, melhor a concordância entre duas variáveis comparadas ou o oposto.

2) O quadrado médio do erro (RMSE) foi realizado de acordo com Loague e Green (1991), sendo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} * \frac{100}{M}}$$

em que: P_i e O_i representa às variáveis estudadas, que no caso do presente estudo foi o rendimento de grãos.

A finalidade do valor de RMSE foi indicar a diferença, em porcentagem, entre os valores simulados e observados das variáveis analisadas. Segundo Jamieson et al., (1991), a simulação é considerada excelente quando RMSE for menor que 10%, boa entre 10 e 20% e fraca quando maior que 30%.

3) Viés (V) que é o percentual de desvio sistemático do valor real, sendo:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i}{n}$$

em que: Y_i = valor observado e \hat{Y}_i = valor estimado; n = número de observações.

4) Correlação de Pearson (R^2), os cálculos são utilizados segundo Hill et al. (2003), sendo:

$$r = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{var}(X)\text{var}(Y)}}$$

em que: $\text{cov}(X, Y)$ é a covariância entre X e Y , onde $\text{var}(X)$ e $\text{var}(Y)$ são as variâncias amostrais de X e Y .

Segundo Figueiredo Filho e Silva Junior (2009), os coeficientes de correlação de Pearson podem ser considerados:

$R=1$: Perfeitamente positiva; $0,8 \leq R < 1$: Forte positiva; $0,5 \leq R < 0,8$: Moderada positiva; $0,1 \leq R < 0,5$: Fraca positiva; $0 \leq R < 0,1$: Íntima positiva e 0: Nula.

5) Para comparar a produtividade entre a simulação de sequeiro e irrigado as médias foram submetidas ao teste t de Student.

Todas as análises foram realizadas com auxílio do software R (R CORE TEAM, 2021) e STATISTICA®.

Resultados e Discussão

Os coeficientes genéticos foram obtidos para o híbrido de milho em estudo (Tabela 3).

Tabela 3. Coeficientes genéticos da cultivar para variedade de milho Status Vip 3.

| Genótipo | P1 | P2 | P5 | G2 | G3 | PHINT |
|--------------|-----|-------|------|-------|------|-------|
| Status Vip 3 | 280 | 0,020 | 1075 | 960,1 | 8,08 | 65 |

P1: °C d⁻¹; P2: °C d⁻¹; P5: °C d⁻¹; G2: Grãos por plantas; G3: Mg/dia por grão; PHINT: °C d⁻¹ por folhas consecutivas.

Além dos coeficientes genéticos, foi necessário fazer ajustes no arquivo “.SPE” (espécie) dos coeficientes genéticos, sendo: RSGRT (número de dias consecutivos que a taxa relativa de crescimento do grão está abaixo do necessário, desencadeando a maturidade fisiológica antecipada) de 5,0 para 30,0. CARBOT (número consecutivo de dias que a planta passa por período crítico por excesso de temperatura, déficit hídrico ou déficit de nitrogênio) de 7,0 para 30,0. Isto foi necessário porque quando a planta era submetida a estresse hídrico prolongado, o modelo antecipava a maturidade fisiológica de grãos mais que o necessário. E também no arquivo de coeficientes genéticos “.ECO” (ecofisiológico) do modelo precisou ser alterado o valor de RUE (eficiência do uso de radiação) passando da constante determinada pelo modelo com e sem estresse hídrico de 4,2 g MJ⁻¹ para então 8,0 g MJ⁻¹, sendo este o coeficiente que representou a melhor resposta quando a simulação encontrou-se em déficits hídricos mais extremos. Semelhante ao presente estudo, Song e Jin (2020) notaram que quando o experimento era irrigado o modelo oferecia bom desempenho, mas quando em regime de sequeiro não gerava resultado real, sendo necessário fazer ajustes nestes parâmetros para melhorar a simulação.

Ao analisar as condições meteorológicas nos diferentes municípios (Figura 2), nota-se as diferenças existentes nas condições térmicas e hídricas.

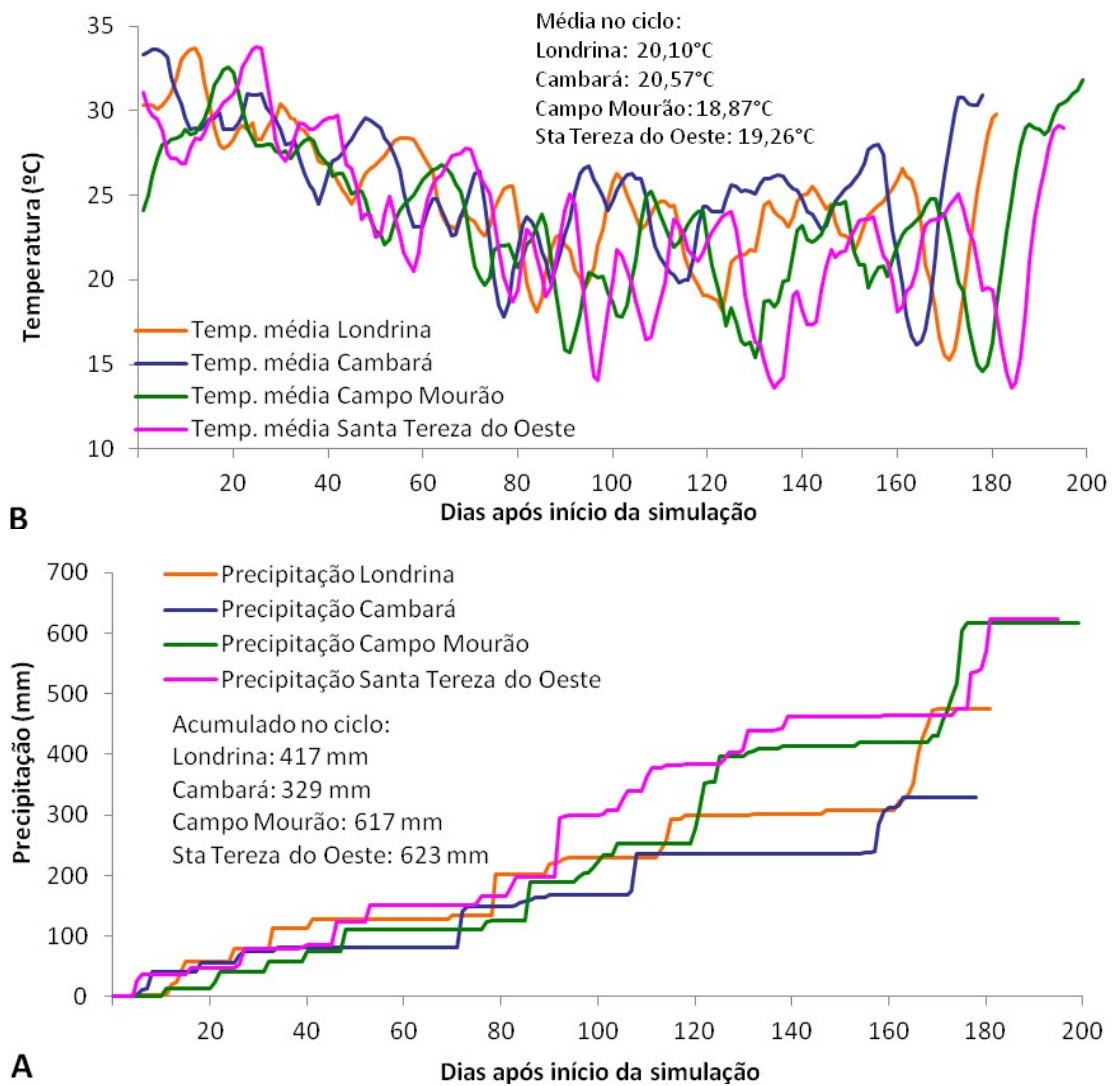


Figura 2. Precipitação acumulada (A), temperaturas médias diárias (B) ao longo do ciclo da cultura nos ensaios de validação do modelo DSSAT em quatro municípios do Terceiro Planalto Paranaense no ano de 2020.

Na Figura 2A, observa-se que os municípios com maior volume acumulado de chuva durante o ciclo da cultura foram Campo Mourão e Santa Tereza do Oeste com 617 e 623 mm, respectivamente, seguido por Londrina com 417 mm e o município com menor índice pluviométrico foi Cambará com 329 mm. Com estes volumes de precipitação acumulada identificou-se que a chuva foi suficiente para satisfazer as necessidades hídricas da cultura nos municípios de Campo Mourão, Santa Tereza do Oeste e Londrina, já um pouco abaixo do ideal para o município de Cambará, uma vez que, segundo Galon et al., 2010 as necessidades hídricas da

cultura variam de 400 a 600 mm no ciclo.

A variável temperatura média do ar (Figura 2B), também foi bem distinta entre os diferentes municípios. A média durante o ciclo da cultura para Cambará, Londrina, Campo Mourão e Santa Tereza do Oeste foi de 20,57, 20,10, 18,87, 19,26 °C, respectivamente. Sendo Campo Mourão o município com a temperatura mínima média mais baixa com 12 °C. Segundo Caron et al. (2017), temperaturas mínimas mais baixas afetam a produtividade. O município com a temperatura máxima média mais alta foi Cambará com 28,59 °C. Segundo Teixeira et al. (2020), em estudos em diferentes localidades do Estado do Paraná, identificaram que quanto mais alta a temperatura, menos aptidão à cultura do milho as localidades representam. Em Cambará conforme observamos, a redução do ciclo em função da temperatura, segundo Minuzzi e Lopes (2015), é baseado no conceito de graus-dia acumulados, desta forma quanto mais quente a região, mais rapidamente a cultura atingira seu ciclo.

A radiação solar global média durante os ensaios também foi diferente entre os municípios em estudo. Cambará com média durante o ciclo da cultura de 13,49 MJ m⁻² d⁻¹, Londrina com 16,00 MJ m⁻² d⁻¹, Campo Mourão 15,75 MJ m⁻² d⁻¹ e Santa Tereza do Oeste 9,78 MJ m⁻² d⁻¹. A radiação solar é tão importante quanto o suprimento hídrico para o milho segundo Monteiro et al. (2019), que detectou tal influência ao estudar variáveis biométricas e produtividades de híbridos na região Oeste do Paraná.

Conforme observado nas variações meteorológicas para os quatro diferentes municípios do Terceiro Planalto Paranaense, na Tabela 4 foi possível detectar a diferença entre os ciclos da mesma cultivar, com os dados observados corroborando na mesma amplitude com os dados simulados pelo modelo CERES-maize.

Tabela 4. Número de dias após a semeadura até a maturidade fisiológica, observado e simulado nos ensaios de validação do modelo DSSAT para quatro municípios no Terceiro Planalto Paranaense no ano de 2020.

| Município | Maturidade fisiológica | |
|---------------------------|------------------------|----------|
| | Observado | Simulado |
| Dias após semeadura (DAS) | | |
| Cambará | 176 | 177 |
| Londrina | 183 | 173 |
| Campo Mourão | 191 | 198 |
| Santa Tereza do Oeste | 184 | 186 |

O ciclo da cultura até a maturidade fisiológica no município de Cambará foi o mais precoce, por ter sido o município que apresentou valores mais elevados de temperatura máxima do ar e o que apresentou menor índice pluviométrico. Silva et al. (2021) observou impactos negativos e adiantamento de ciclo quando a cultura do milho foi submetida ao déficit hídrico, semelhante ao presente trabalho.

O município de Campo Mourão, foi o local com maior ciclo da cultura, causado pelas menores temperaturas, e pela maior disponibilidade hídrica, não deixando a cultura encerrar o ciclo precocemente. Segundo Minuzzi e Lopes (2015), quanto mais baixas as temperaturas, o acúmulo de graus-dia ocorre mais lentamente, ficando a cultura com ciclo mais longo.

Já os municípios de Londrina e Santa Tereza do Oeste ficaram com ciclos intermediários, porém todos seguindo as mesmas razões de ciclo vistos nos outros dois municípios. O modelo CERES-maize teve bom desempenho entre os resultados observados e simulados referente ao ciclo. Pereira et al. (2010), também consideraram o modelo uma ferramenta eficiente para simulação do ciclo da cultura do milho, ao analisar a eficiência do modelo para diferentes híbridos.

O modelo CERES-maize calibrado e validado em Londrina, obteve boa eficiência de coeficientes genéticos para simulação nas outras localidades para o Terceiro Planalto Paranaense (Figura 3).

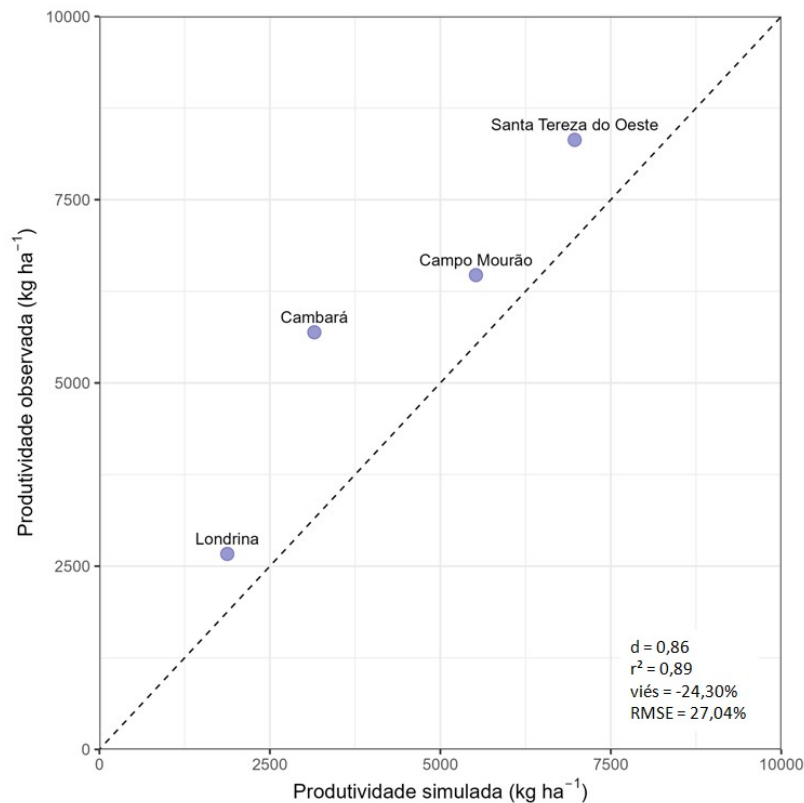


Figura 3. Produtividades de grãos simulada e observada, nos quatro municípios do Terceiro Planalto Paranaense no ano de 2020.

A produtividade média observada e simulada para Londrina foi 2.667 e 1.875 kg ha⁻¹, Cambará 5.691 e 3.151 kg ha⁻¹, Campo Mourão 6.471 e 5.521 kg ha⁻¹ e Santa Tereza do Oeste 8.316 e 6.969 kg ha⁻¹, respectivamente. Para eficiência do modelo, observou-se que o valor de RMSE foi de 27,03% sendo considerado válido em uma simulação, valor de viés de -24,30% que é considerado um nível adequado mostrando subestimação do modelo nas simulações, o valor de correlação de 0,89 sendo considerada fortemente positiva e índice “d” de concordância de 0,86 demonstrando proximidade à unidade, o que demonstra concordância entre as duas variáveis observadas/simuladas testadas. Valores de índice “d” de 0,8 também foram encontrados por Amaral et al. (2015), ao testar diferentes híbridos de milho para uma microrregião em Pelotas, RS. O mesmo autor também explica valores de RMSE ser comum até mesmo passar de 30%, o que é ocasionado geralmente pela variabilidade genética, ligada ao sistema de cultivo de sequeiro com suas diversidades fisiológicas.

Após a validação das simulações para os quatro municípios em estudo em cultivo em sequeiro, foram realizadas simulações para verificar o

potencial da cultivar em estudo, se submetido à irrigação, utilizando a mesma adubação e tratos culturais das simulações em sequeiro.

Na Figura 4 podemos identificar que entre os dois tratamentos (sequeiro e irrigado) ocorreu diferença estatística significativa pelo teste “t” de Student. Isto mostra que o modelo é capaz de dimensionar o ganho de produtividade em cada uma destas regiões mesmo sem ter realizado ensaio de campo em condição irrigada.

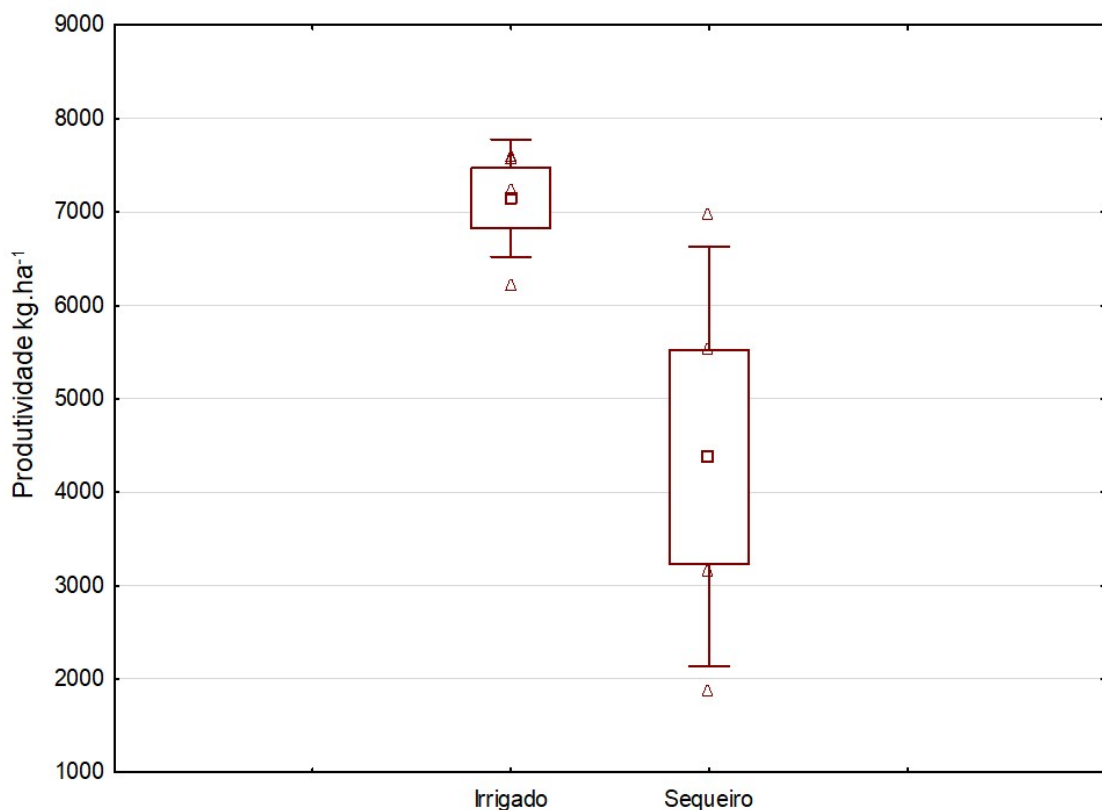


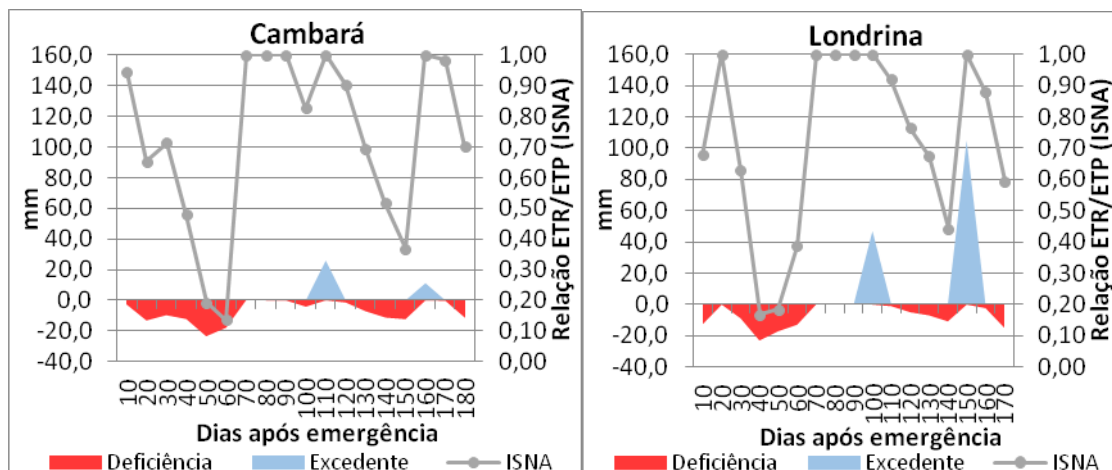
Figura 4. Produtividade de grãos simulada em condições de sequeiro e irrigado, nos quatro municípios do Terceiro Planalto Paranaense no ano de 2020.

Os municípios mais ao norte da região do Terceiro Planalto Paranaense foram os que mais tiveram incremento de produtividade com a irrigação (Tabela 5). Este fato, segundo Salton et al. (2021), ocorre porque a região norte do Paraná é mais afetada por secas, devido à influência das condições geográficas e dinâmica da circulação atmosférica divergentes existentes no Estado que afetam mais essa região.

Tabela 5. Produtividade de grãos simulada em condições de sequeiro e irrigado e percentual de ganho de produtividade quando irrigado, nos quatro municípios do Terceiro Planalto Paranaense no ano de 2020.

| Município | Produtividade kg.ha ⁻¹ | | |
|-----------------------|-----------------------------------|----------|----------------------|
| | Sequeiro | Irrigado | % de ganho produtivo |
| Cambará | 3151 | 7592 | 58 |
| Londrina | 1875 | 7551 | 75 |
| Campo Mourão | 5521 | 6220 | 11 |
| Santa Tereza do Oeste | 6969 | 7238 | 4 |

Para justificar a diferença entre as diferentes localidades do Terceiro Planalto Paranaense a Figura 5 mostra o balanço hídrico com os valores de excedente, déficit hídrico e valores de ISNA durante o ciclo da cultura em cada município.



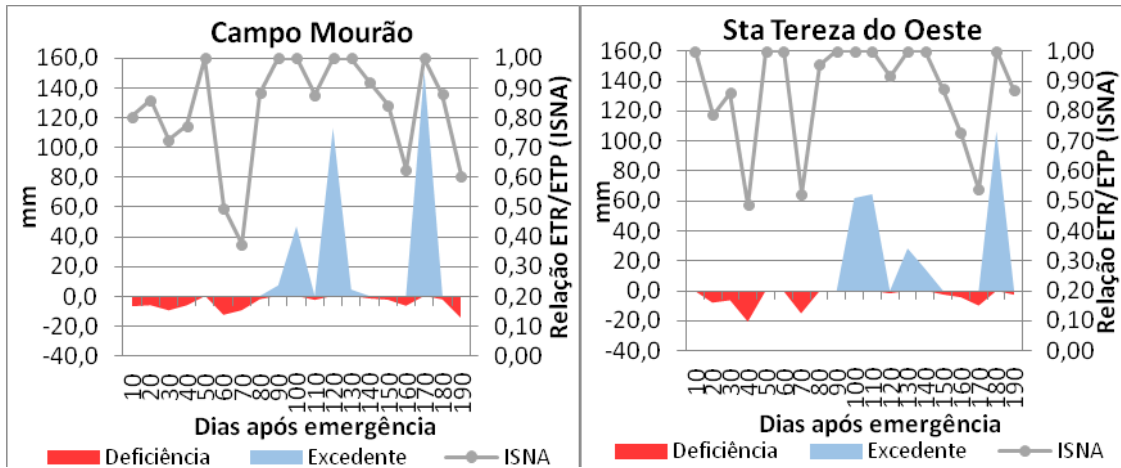


Figura 5. Balanço hídrico com os valores de excedente, déficit hídrico e valores de ISNA no ciclo da cultura em quatro municípios do Terceiro Planalto Paranaense no ano de 2020.

Ao analisar os dados, podemos notar a produtividade máxima pela condição irrigada não tão distantes entre os diferentes municípios, porém os que possuíam temperaturas mais altas, e maior radiação solar com o suprimento hídrico adequado, produziram mais do que as localidades mais frias, e conseqüentemente, associadas a menor radiação solar. Diferenças entre sequeiro e irrigado semelhantes aos 58% de Cambará, também foram identificados por Sousa et al. (2015), que encontrou diferença de 59,5% ao testar a eficiência de genótipos de milho sob déficit hídrico e irrigado. A maior diferença entre o sequeiro e o irrigado foi de 75% em Londrina, também foi identificada por Bastos et al. (2012), que realizaram um estudo para identificar os melhores híbridos para cultivo sob déficit hídrico.

Um fator importante a ressaltar nos experimentos irrigados, é que a época de semeadura e a adubação é uma variável importante a ser levada em consideração em análises mais aprofundadas, pois dependendo da época de semeadura e concentração de adubação, poderá acarretar maior ou menor ganho produtivo. Esta questão foi comprovada por Rugira et al. (2021), que testou 32 cenários de irrigação, em diferentes épocas de semeadura com o modelo DSSAT e concluíram que, dependendo da época de semeadura, a planta além do suprimento hídrico, explora os melhores potenciais de radiação solar e temperatura média do ar. Outro fator importante é que o teto produtivo é aumentado de acordo com a adubação. Nos ensaios do presente trabalho foram utilizadas adubações

intermediárias, comumente usadas pelos produtores na cultura do milho.

Desta forma o modelo DSSAT foi eficiente para identificar o aumento da eficiência produtiva para as regiões mais quentes e com menor índice pluviométrico, como as regiões de Londrina e Cambará, que possuem maior retorno produtivo com o uso de irrigação.

Conclusão

O modelo DSSAT teve boa performance após ser calibrado e validado para Londrina, gerando resultados simulados com performance satisfatória para os municípios de Cambará, Campo Mourão e Santa Tereza do Oeste. Foi possível visualizar as diferenças de produtividade e duração de ciclo do híbrido em estudo na macrorregião do Terceiro Planalto Paranaense.

Com o uso do modelo é possível quantificar o quanto o déficit hídrico reduz a produtividade do milho de segunda safra, mostrando quais municípios teriam

maior ganho produtivo com o uso da irrigação.

Referências

Amaral, T. A., de Lima, A. C. R., de Andrade, C. D. L. T., Silva, S. D. D. A. E. (2015). Parametrização e avaliação do modelo CSM-CERES-MAIZE para cultivares de milho recomendadas microrregião de Pelotas, RS. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 14(3), 371-391. DOI: <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v14n3p371-391>

Andrade, C., de Souza, I. R. P., Amaral, T. (2020). Protocolo para coleta e análise de dados experimentais para calibração e avaliação do modelo CSM-CERES-Maize para a cultura do milho. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1126467/1/Doc-253.pdf>

Aparecido, L. E. O., Torsoni, G. B., Mesquita, D. Z., de Meneses, K. C. (2020). Modelagem da produtividade do milho safrinha em função das condições climáticas do Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Climatologia*, 26. DOI: 10.5380/abclima.v26i0.69183

Bastos, E. A., Cardoso, M. J., de Sousa, R. S., de Andrade Junior, A. S., Ribeiro, V., de Brito, R. R., Brito, R. R. (2012). Productive performance of maize genotypes under water deficit in Teresina, Piauí State, Brazil. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ramilos-De-Brito/publication/275273327_Productive_performance_of_maize_genotypes_ununu_water_deficit_in_Teresina_Piaui_State_Brazil/links/5536829b0cf218056e999a54/Productive-performance-of-maize-genotypes-under-water-deficit-in-Teresina-Piaui-State-Brazil.pdf

Bhering, S. B., Santos, H. G. dos. (2008). Mapa de solos do Paraná: legenda atualizada. Embrapa Solos. 74 p. http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Aparana_solos_20201105#momo

Caron, B. O., Oliveira, D. M., Elli, E. F., Eloy, E., Schwerz, F., Souza, V. Q. (2017). Elementos meteorológicos sobre características morfológicas e produtivas do milho em diferentes épocas de semeadura. *Científica*, 45, (2), 105-114. DOI: 10.15361/1984-5529.2017v45n2p105-114.

Conab. Companhia Nacional de Abastecimento. (2023). Acompanhamento da safra Brasileira de grãos. 10(9). Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>

Deral. Departamento de Economia Rural. (2023). Sistema de acompanhamento de safra subjetiva / PPS. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documentd/2023-05/pss_2223_05-22_mai.pdf

Embrapa. (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília. 353p.

Faria de, R. T., Caramori, P. H. (1986). Caracterização físico-hídrica de um Latossolo roxo distrófico do município de Londrina, PR. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 21(12), 1303-1311.

Farias, J. R. B., Assad, E. D., Almeida, I. D., EVANGELISTA, B. A., Lazzarotto, C., Neumaier, N., & Nepomuceno, A. L. (2001). Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9(3), 415-421.

Galon, L., Tironi, S. P., Rocha, A. D., Soares, E. R., Concenço, G., Alberto, C. M. (2010). Influência dos fatores abióticos na produtividade da cultura do milho. *Revista Tropic–Ciências Agrárias e Biológicas*, 4(3), 18.

Garbuglio, D. D., Gerage, A., Araújo, P., Bianco, R., Custódio, A. (2021). Avaliação estadual de cultivares de milho segunda safra 2020. IDR-Paraná.

<https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/BT100-Avaliacao-estadual-de-cultivares-de-milho-segunda-safra-2020>.

García-Montesinos, L. E., Fernández-Reynoso, D. S., Rubio-Granados, E., Martínez-Menez, M. R., Tijerina-Chávez, L. (2020). Rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en la mixteca, calculado con DSSAT. *Terra Latinoamericana*, 38(4). Disponível em: https://scholar.google.pt/scholar?start=10&q=modelagem+dssat&hl=pt-BR&as_sdt=0,5&as_ylo=2019

González, O. R., Bacallao, R. F., Córdova, N. H., Carreño, F. S., Mompié, E. I. J., Viera, D. G., Montenegro, R. J. V. (2021). Simulación de estrategias de manejo a partir del modelo DSSAT para incrementar los rendimientos de un cultivar de maíz. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 55(2). Disponível em: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2079-34802021000200008

Hoogenboom, G., C. H. Porter, V., Shelia, K. J., Boote, U.; Singh, J. W., White, L. A., Hunt, R., Ogoshi, J. I., Lizaso, J., Koo, S., Asseng, A., Singels, L. P., Moreno, W., Jones, J. W. (2017). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7. DSSAT Foundation, Gainesville. <https://DSSAT.net>

Hoogenboom, G., C. H., Porter, K. J., Boote, V., Shelia, P. W., Wilkens, U., Singh, J. W., White, S., Asseng, J. I., Lizaso, L. P., Moreno, W., Pavan, R., Ogoshi, L. A., Hunt, G. Y., Tsuji, J. W., Jones, J. W. (2019). The DSSAT crop modeling ecosystem: Advances in Crop Modeling for a Sustainable Agriculture. Burleigh Dodds Science Publishing. 173-174.

Hoogenboom, G., Jones, J. W., Wilkens, P. W., Porter, C. H., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Boote, K. J., Singh, U., Uryaseva, O., Bowen, W. T., Gijnsman, A. J., Du toit, A. S., White, J. W., Tsuji, G. Y. (2003). Decision support system for agrotechnology transfer: version 4.0 (compact disc). Honolulu: University of Hawaii.

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U.; Gijnsman, A. J., Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European journal of agronomy*, 18, (3-4), 235-265.

Melo, M. L. A., Camilo, J. A., DE Andrade, C. D. L. T., Amaral, T. A., DE Souza, I. R. P., Simeão, R. M. (2021). Sowing period and estimated maize production for silage under tropical conditions. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 20. DOI: <https://doi.org/10.18512/rbms2021v20e1219>

MINEROPAR. (2010). Unidades morfoestruturais do Paraná. Disponível em: <https://webgeo.pr.gov.br/mapserver/mineropar/geo.html>

Minuzzi, R. B., Lopes, F. Z. (2015). Desempenho agrônômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19, 734-740. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p734-740>

Monteiro, M. F., Moreira, C. R., Canzi, G. M., de Paula Souza, G. B., & Peres, D. M. (2019). Variáveis biométricas e produtividade de híbridos de milho na região oeste

do Paraná. Revista Técnico-Científica. 1-14. Disponível em: <https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/555>

Moraes, M. T., Debiasi, H., Franchini, J. C. (2018). Modelagem da dinâmica da água em sistemas de preparo de um Latossolo vermelho. *Revista Scientia Agrária*. 19(1), 142-152.

Msowoya, K., Madani, K., Davtalab, R., Mirchi, A., Lund, J. R. (2016). Climate change impacts on maize production in the warm heart of Africa. *Water Resources Management*, 30(14), 5299-5312. DOI: 10.1007/s11269-016-1487-3

Nitsche, P. R., Caramori, P. H., Ricce, W. E. S., Pinto, L. F. D. (2019). Atlas climático do Estado do Paraná. IAPAR. <https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Atlas-Climatico>

Pereira, A. M. D. A. R., Von Pinho, R. G., Paglis, C. M., Pereira, J. L. D. A. R., & Altoé, T. F. (2010). Eficiência do modelo Ceres-Maize na simulação do desempenho de híbridos de milho. *Revista Ceres*, 57, 486-493. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000400008>

Pereira, L. M. P., Caramori, P. H., Ricce, W. S., Silva, D. A., & Caviglione, J. H. (2008). Determinação do início e término da estação chuvosa no estado do Paraná. *Revista Geografar*, 3(2).

Perissato, S. M., Marcelino, W. L., Acco, L. F., Cabral, A. C., Patricia, L., & Pinto, J. P. F. (2013). Efeito das geadas em culturas energéticas. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 1, 49-58. Disponível em: <https://core.ac.uk/reader/328077830>

Perondi, D., Fraise, C. W., Staub, C. G., Cerbaro, V. A., Barreto, D. D., Pequeno, D. N., Pavan, W. (2019). Crop season planning tool: Adjusting sowing decisions to reduce the risk of extreme weather events. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 62-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.013>

Rolim, G. S., Sentelhas, P. C., Barbieri, V. (1998). Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 6, 133-137.

Rugira, P., Ma, J., Zheng, L., Wu, C., & Liu, E. (2021). Application of DSSAT CERES-maize to identify the optimum irrigation management and sowing dates on improving maize yield in Northern China. *Agronomy*, 11(04), 674. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040674>

Salton, F. G., Morais, H., & Lohmann, M. (2021). Períodos secos no estado do Paraná. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36, 295-303. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863620163>

Silva, S., da Paz Sousa, A. C., da Silva, C. S., Araújo, E. R., da Silva Soares, M. A., & Teodoro, I. (2021). Parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro. *IRRIGA*, 1(1), 30-41. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v1n1p30-41>

Song, L., & Jin, J. (2020). Improving CERES-Maize for simulating maize growth and yield under water stress conditions. *European Journal of Agronomy*, 117, 126072. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126072>

Sousa, R. S., Bastos, E. A., Cardoso, M. J., Ribeiro, V. Q., de Brito, R. R. (2015). Desempenho produtivo de genótipos de milho sob déficit hídrico. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 14(1), 49-60. <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v14n1p49-60>

Team, R. C. (2021). R: A language and environment for statistical computing. Published online 2020. *Supplemental Information References S*, 1, 371-78.

Teixeira, L. A. R., Jadoski, S. O., Faggian, R., & Sposito, V. (2020). Efeito de alterações climáticas na aptidão agrícola para cultivo de milho na microrregião de Guarapuava, Paraná. *Research, Society and Development*, 9(4), 5. DOI: 10.33448/rsd-v9i4.2461

Tornthwaite, C. W., Mather, J. R. (1955). *The water balance*. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology. 104p.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo CERES-maize apresentou boa eficiência de simulação no município de Londrina, PR, sendo validado em condições irrigado e sequeiro nos dois anos de ensaios. Comprovou-se a eficiência do modelo identificar o quanto o suprimento hídrico pode acrescentar de produtividade quando comparado ao cultivo de sequeiro.

O modelo testado para os quatro municípios que compreende a ampla macrorregião do Terceiro Planalto Paranaense teve boa performance de simulação de produtividade e fenologia. Foi possível identificar a sensibilidade do modelo simular o potencial produtivo de acordo com as diferentes temperaturas, precipitações e radiações solar global.

O modelo após calibrado e ajustados os coeficientes genéticos, quando simulado em condições irrigadas, apresentou bom desempenho com as configurações originais dos coeficientes espécie e ecofisiológico. Porém quando submetidos a condições mais drásticas de deficit hídrico, o modelo requer ajustes nos coeficientes de espécie e ecofisiologia para ajustar às produtividades observadas.

De forma geral o modelo CERES-maize é uma ferramenta que possui bom desempenho em simulações de diferentes condições de suprimentos hídrico e diferentes regiões das quais foi calibrado. O comportamento do modelo às condições brasileiras, principalmente quando a cultura se desenvolve em déficit hídrico, requer atenção para a calibração de todos seus coeficientes genéticos para ter boa eficiência.