UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DOUTORADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

JOÃO IRENE FILHO

MODELAGEM DO CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA NA REGIÃO DO CERRADO DO SUDOESTE PIAUIENSE

Bom Jesus - PI
2024

JOÃO IRENE FILHO

MODELAGEM DO CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA NA REGIÃO DO CERRADO DO SUDOESTE PIAUIENSE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Ciência do Solo como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências Agrárias.

Orientador: Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior
Coorientador: Prof. Dr. Everaldo Moreira da Silva

Bom Jesus - PI

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial do Campus Professora Cinobelina Elvas
Serviço de Processamento Técnico

I66m Irene Filho, João.
Modelagem do crescimento e produtividade de grãos de soja na região do cerrado do sudoeste piauiense./ João Irene Filho. – 2024.
84 f.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias, Bom Jesus-PI, 2024.
Orientação: "Prof. Dr. Anderson Soares de Andrade Júnior".

1. Soja-produção. 2. Modelagem agrícola. 3. Soja-crescimento. I. Irene Filho, João. II. Andrade Júnior, Anderson Soares de. III. Título.

CDD 633.3421

Elaborado por Sérvulo Fernandes da Silva Neto – CRB-15/603

JOÃO IRENE FILHO

MODELAGEM DO CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA NA REGIÃO DO CERRADO DO SUDOESTE PIAUIENSE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, do Campus Professora Cinobelina Elvas, da Universidade Federal do Piauí, como requisito à obtenção do título de Doutor em Ciências Agrárias.
Área de concentração: Ciência do Solo.
Linha de pesquisa: Recursos Ambientais, Uso e Manejo do Solo e da Água.

Aprovado em 23 de fevereiro 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br ADERSON SOARES DE ANDRADE JUNIOR
Data: 15/04/2024 10:41:10-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior (Embrapa Meio-Norte)
Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br EVERALDO MOREIRA DA SILVA
Data: 10/04/2024 10:18:30-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Everaldo Moreira da Silva (UFPI)
Coorientador

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE RENATO BOUCAS FARIAS
Data: 11/04/2024 11:29:39-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Jose Renato Bouças Farias (Embrapa Soja)
Examinador Externo ao Programa

Documento assinado digitalmente
gov.br JULIAN JUNIO DE JESUS LACERDA
Data: 11/04/2024 07:22:47-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Julian Junio de Jesus Lacerda (UFPI)
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente
gov.br PAULO FERNANDO DE MELO JORGE VIEIRA
Data: 15/04/2024 10:16:49-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Paulo Fernando de Melo Jorge Vieira (Embrapa Meio - Norte)
Examinador Externo ao Programa

Documento assinado digitalmente
gov.br SANTIAGO VIANNA CUADRA
Data: 11/04/2024 09:05:07-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Santiago Viana Cuadra (Embrapa Agricultura Digital)
Examinador Externo ao Programa

Dedico a Deus, que está sempre presente em cada segundo de nossas vidas; A minha esposa Sara Raquel de Oliveira Coqueiro e minha filha Yasmin Coqueiro de Oliveira Irene; Aos meus queridos e amados pais, Albina Nunes de Sousa Irene e João Irene (em memória) e meus Familiares (em especial Maria das Mercês de Sousa Irene (em memória), a eterna gratidão por terem me apoiado em todos os momentos!!!

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela presença constante em minha vida, pela graça de concluir esta atividade e por ter me concedido muito animo nessa jornada, com muita disposição, esperança, fé.

A minha esposa Sara Raquel de Oliveira Coqueiro, pelo apoio, compreensão e amor.

Ao Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior, pela orientação, paciência, compreensão, pelos ensinamentos, oportunidades, bons momentos durante a condução do trabalho e por ser um exemplo de pessoa a ser seguida, fonte inspiradora de competência e sabedoria.

Ao amigo Prof. Dr. Everaldo Moreira da Silva, pela coorientação, pelo companheirismo e ajuda na viabilização prática deste trabalho, colaboração, conhecimentos, oportunidades, incentivo, conselhos e amizade.

Ao Dr. Paulo Fernando de Melo Jorge Vieira e Dr. Santiago Viana Cuadra, pela colaboração na orientação do trabalho, disponibilização de material de pesquisa, paciência, compreensão e pelos ensinamentos no processo de calibração e validação do modelo DSSAT.

Ao Sr. Ronaldo Marafon e família, por ter disponibilizado a estrutura física para a realização do trabalho de campo e maquinário para preparo da área; além da compreensão, amizade e apoio dado em todos os momentos.

Aos alunos do Curso de Engenharia Agronômica, *Campus* Professora Cinobelina Elvas - CPCE: Arão de Moura Neto, Daniel Barradas Muniz, Iuri de Araújo Moreira, Juliana Tainá Sipert, Matheus de Sousa Dourado, Marcos Alves Feitoza, Rai Gustavo Nasiniak e Wesley Santos Ferreira, pelo apoio nos trabalhos de campo e científico.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Piauí, *Campus* Professora Cinobelina Elvas, pela oportunidade.

À Embrapa Meio-Norte e Embrapa Agricultura Digital, pelo apoio dado com fornecimento de equipamentos e sementes.

À administração do *Campus* Professora Cinobelina Elvas - CPCE, pelo apoio dado com o fornecimento de transportes e laboratórios.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, pelos ensinos científicos.

À banca examinadora por terem aceitado o convite e pelas valiosas contribuições para o engrandecimento dessa Tese.

Ao professor Antônio Carlos Ferraz Filho, pelo apoio, fornecimento de equipamento e ensinamentos científicos.

Aos funcionários do *Campus* Professora Cinobelina Elvas - CPCE: técnico administrativo: Alisson Franco Torres; motoristas: Dogval Correia de Sousa, Helvídio Pereira dos Anjos, Jonathas de Lisboa, Marcelo Rosal Bezerra Barros e Maurilio Alves dos Santos Miranda, pelo apoio dado na viabilização da realização dos trabalhos de campo.

Aos meus colegas de sala de aula (em especial Doze Batista de Oliveira e Estefenson Marques Morais), que caminhamos juntos, a eterna gratidão por terem me apoiado em todos os momentos desta caminhada.

Meus eternos agradecimentos.

‘*O homem vale pelo quanto evolui, e não pelo que é ou*

***pelo que aparenta ser num dado momento*”**

Herculano Pires

RESUMO

O cultivo da soja se destaca como uma das principais atividades agrícolas da região dos cerrados do Sudoeste Piauiense. Objetivou-se calibrar, avaliar e utilizar o modelo DSSAT CSM-CROPGRO-Soybean na simulação do crescimento e rendimento de grãos de soja na região do cerrado do Sudoeste Piauiense. Para a parametrização do modelo, foram utilizados dados do ano agrícola 2019-2020, de um experimento instalado na Fazenda Vô Desiderio, Serra do Quilombo, município de Bom Jesus-PI (9º16'20,3" S, 44º44'56,9" O e altitude 620 m). Foram parametrizadas as cultivares BRS 8980 IPRO (BRS 8980), BMX 84I86 (Domínio), BMX 81I81RSF IPRO (Extrema) e BMX 8579 IPRO (Bônus), em três datas de semeadura (29/11/2019, 14/01/2020 e 30/01/2020). A avaliação do modelo foi realizada com dados de rendimento de grãos de soja coletados em ensaios de valor de cultivo e uso (VCU) conduzido pela Embrapa Meio-Norte, na Fazenda Celeiro, Serra do Quilombo, Bom Jesus, PI, durante quatro safras e envolvendo 61 genótipos. Para testar a utilização do modelo, comparou-se estimativas do modelo com rendimentos observados em lavoura comercial de soja, na Serra do Quilombo em Bom Jesus-PI, em 17 safras. Os resultados de produtividade simulados foram analisados em termos de distribuição de frequência e de quebra da produtividade. Os melhores índices estatísticos que evidenciam a eficiência do processo de calibração foram observados para as cultivares BRS 8980 (1ª época de semeadura) e Bônus (3ª época de semeadura), com índices R^2 e *d*-Stat superiores a 0,90. Quanto a utilização do modelo, os resultados mostraram que as semeaduras realizadas no primeiro decêndio de novembro apresentaram ciclos mais longos, enquanto as semeaduras mais tardias resultaram em ciclos mais curtos. Essa diferença de duração foi de 16,4% para a cultivar BRS 8980 e de 13,1% para a cultivar Domínio. O processo de avaliação da consistência da variabilidade da produtividade de soja em relação aos rendimentos simulados foi realizado por meio da comparação entre os rendimentos simulados e medidos. As melhores datas de semeadura foram observadas para o segundo e terceiro decêndio de novembro e primeiro decêndio de dezembro, enquanto a pior data foi o terceiro decêndio de janeiro, para todos os municípios avaliados. A definição da melhor data de semeadura para a região, pode variar de acordo com o nível de risco que o tomador de decisão está disposto a assumir. Conclui-se que: (1) a produção de biomassa seca total estimada apresentou alta concordância com os valores medidos, refletindo eficazmente o decréscimo da produção em função da data de semeadura. (2) em relação ao rendimento de grãos, no processo de validação do modelo, os valores foram superestimados pelo modelo, padrão similar ao obtido em outros estudos. Porém, o modelo retratou bem a variabilidade da produtividade de grãos em função das datas de semeadura, assim como o rendimento de grãos para simulações de outras quatro safras, independentes da safra onde o modelo foi calibrado; (3) as semeaduras realizadas no primeiro decêndio de novembro apresentaram estimativas de ciclos mais longos, enquanto as semeaduras mais tardias resultaram em ciclos mais curtos; (4) a utilização do modelo de simulação DSSAT CSM-CROPGRO-Soybean mostrou-se ferramenta adequada para auxiliar na tomada de decisões relacionadas ao cultivo de soja na região do cerrado do Sudoeste piauiense.

Palavras-chave: Modelagem agrícola; análise de crescimento; época de semeadura; risco climático.

ABSTRACT

Soybean cultivation stands out as one of the main agricultural activities in the Cerrado biome in the southwest region of the Piauí state, Northeastern Brazil. The study aimed to calibrate, evaluate, and use the DSSAT CSM-CROPGRO Soybean Model to simulate soybean growth and yield in the Cerrado biome in the southwest region of the Piauí state. To parameterize the mentioned model, the 2019-2020 crop season data from an experiment conducted at the Vô Desiderio Farm, located on Serra do Quilombo, in the municipality of Bom Jesus, Southwest Piauí (9º16'20.3" S, 44º44'56.9" W, and an altitude of 620 meters) was used. The cultivars BRS 8980 IPRO (BRS 8980), BMX 84I86 (Domínio), BMX 81I81RSF IPRO (Extrema), and BMX 8579 IPRO (Bônus) were assessed on three different sowing dates (11/29/2019, 01/14/2020, and 01/30/2020). The model evaluation was conducted by using soybean grain yield data collected from Value for Cultivation and Use (VCU) tests conducted by Embrapa Meio-Norte at Celeiro Farm, on Serra do Quilombo, in Bom Jesus-PI, involving 61 soybean genotypes during four crop seasons. Two soybean cultivars were considered for testing the model usability: the BRS 8980 IPRO (BRS 8980) and the BMX 84I86 (Domínio). The simulated yield results were analyzed regarding frequency distribution and yield gap. The best statistical indexes highlighting the calibration process efficiency were observed in cultivars BRS 8980 (first sowing date) and Bônus (third sowing date), with R^2 and *d*-Stat indexes exceeding 0.90. Regarding the model used, the results showed that the sowings from the first ten days of November had longer cycles, while the later sowings resulted in shorter cycles. It was a 16.4% duration difference for cultivar BRS 8980 and 13.1% for cultivar Domínio. The consistency of soybean yield variability was evaluated compared to simulated yields by comparing simulated and measured yields on a commercial soybean production farm in Bom Jesus-PI. The best sowing dates observed were the second and third ten days of November and the first ten days of December, while the worst date was the third ten days of January in all municipalities assessed. The choice of the best sowing date for the studied region may vary depending on the decision-maker's risk tolerance. In conclusion: (1) total dry biomass production revealed a high agreement with measured values, effectively contemplating the decrease in production based on the sowing date; (2) regarding the grain yield during the model validation process, the model overestimated its values, a pattern similar to those obtained in other studies. However, the model effectively portrayed the variability of grain productivity based on sowing dates, as well as the grain yield simulations for the other four harvests, independent of the harvest in which the model was calibrated; (3) the sowings in the first ten days of November had longer cycles, while later sowings resulted in shorter cycles; (4) the DSSAT CSM-CROPGRO-Soybean simulation model proved to be a suitable tool while assisting decisions related to soybean cultivation in the Cerrado biome in the southwest region of the Piauí state, Brazil.

Keywords: Agricultural modeling; growth analysis; sowing date; climate risk.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Expansão geográfica da cultura da soja no Brasil entre 1975 e 2018 19
Figura 2 - Visão geral dos componentes e estrutura modular do CSM-DSSAT 28
Figura 3 - Visão geral do Sistema de Apoio à Transferência de Agrotecnologia (DSSAT)..... 28
Figura 4 - Localização da área experimental destacando a mesorregião Sudoeste Piauiense (A, B), a Fazenda Vô Desiderio (C) e o local de realização dos ensaios (D). Serra do Quilombo, Bom Jesus, PI..... 34
Figura 5 - Imagens das cultivares de soja avaliadas, no campo experimental 36
Figura 6 - Croquis da área experimental (A) e detalhes da caixa central com datalogger (B), pluviômetro (C) e sensores de umidade do solo (D) instalados no ensaio. Serra do Quilombo, Bom Jesus, PI..... 37
Figura 7 - Curva de retenção de água no solo da área experimental, Serra do Quilombo - Bom Jesus, PI. Fonte: Laboratório de Água e Solos da Embrapa Meio-Norte..... 39
Figura 8 - Localização da área de cultivo de soja destacando a mesorregião Sudoeste Piauiense 44
Figura 9 - Visão geral das opções de simulação do módulo XBuild do modelo DSSAT .. 46
Figura 10 - Temperatura máxima, mínima e precipitação ao longo do ciclo 49
Figura 11 - Balanço hídrico do solo, em função da precipitação pluvial durante o ciclo das cultivares 50
Figura 12 - Variável peso das folhas das cultivares ao longo do ciclo de desenvolvimento 51
Figura 13 - Biomassa seca aérea total ao longo do ciclo observados (símbolos) e simulados (linhas) em função das datas de semeadura e cultivares: (A) semeadura realizada no dia 29/11/2019 (BRS 8980), (B) semeadura em 14/01/2020 (Domínio) e (C e D) semeadura em 30/01/2020 (Extrema e Bônus)..... 53
Figura 14 - Peso de vagens ao longo do ciclo observados e simulados para as cultivares BRS 8980, Domínio, Extrema e Bônus 54
Figura 15 - Variável rendimento de grãos das cultivares BRS 8980, Domínio, Extrema e Bônus, representado por barras cinza (simulado) e preto (observado)..... 56
Figura 16 - Correlação de Pearson entre rendimento observado (Obs) e simulado (Si) (avaliações em 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020)..... 58
Figura 17 - Precipitação pluvial mensurada (barras azul-claro) e acumulada durante as safras (barras azul-escuro) nas áreas experimentais da fazenda comercial de soja avaliada nas safras 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020..... 59
Figura 18 - Rendimento de grãos observado e simulado para cultivares de soja de tipo de crescimento determinado e indeterminado, das safras 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020 60

Figura 19 - Distribuição de frequência da produtividade de grãos de soja para as condições de solo tipo 1, indicando valores mínimos, máximos, medianos e percentis, para diferentes datas de semeadura, em regime de sequeiro. A= Baixa Grande do Ribeiro, B= Bom Jesus, C= Currais, D= Monte Alegre do Piauí, E= Palmeira do Piauí, F= Ribeiro Gonçalves, G= Santa Filomena e H= Uruçuí..... 63
Figura 20 - Distribuição de frequência da produtividade de grãos de soja para as condições de solo tipo 2, indicando valores mínimos, máximos, medianos e percentis, para diferentes datas de semeadura, em regime de sequeiro. A= Baixa Grande do Ribeiro, B= Bom Jesus, C= Currais, D= Monte Alegre do Piauí, E= Palmeira do Piauí, F= Ribeiro Gonçalves, G= Santa Filomena e H= Uruçuí..... 65
Figura 21 - Distribuição de frequência da produtividade de grãos de soja para as condições de solo tipo 3, indicando valores mínimos, máximos, medianos e percentis, para diferentes datas de semeadura, em regime de sequeiro. A = Baixa Grande do Ribeiro, B= Bom Jesus, C= Currais, D= Monte Alegre do Piauí, E= Palmeira do Piauí, F= Ribeiro Gonçalves, G= Santa Filomena e H= Uruçuí..... 68
Figura 22 - Distribuição de frequência da produtividade média de grãos de soja observado pelo produtor na Serra do Quilombo e a produtividade média de grãos de soja simulada para o município de Bom Jesus, PI, durante 17 safras. S1= solo tipo 1 (0.40 mm cm-1 de AD), S2 = solo tipo 2 (0.66 mm cm^{-1} de AD), S3= solo tipo 3 (1.21 mm cm-1 de AD 73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rendimento médio de soja das regiões do Brasil, safra 2023 23
Tabela 2 - Análise química e física do solo da área experimental na Fazenda Vô Desidério município de Bom Jesus, Piauí..... 35
Tabela 3 - Cultivares, grupo de maturidade, datas de semeadura, maturação fisiológica e colheita do experimento de campo safra 2019/2020 35
Tabela 4 - Parâmetros de entrada utilizados na calibração do solo Latossolo Amarelo Distrófico argissólico da região, incorporados à base de dados do DSSAT v 4.7..... 39
Tabela 5 - Safra, datas de semeadura e colheita, dos experimentos de campo das safras 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020 na Fazenda Celeiro, município de Monte Alegre do Piauí. 40
Tabela 6 - Cultivares avaliadas em ensaios de VC U anos agrícolas de 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020 na Fazenda Celeiro, município de Monte Alegre do Piauí 41
Tabela 7 - Municípios do Sudoeste Piauiense avaliados nas simulações, com respectivas coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude)..... 45
Tabela 8 - Valores finais dos coeficientes de cultivar calibrados com dados do experimento em Bom Jesus-PI, para BRS 8980 (MG 8.9), Domínio (MG 8.4), Extrema (MG 8.1) e Bônus (MG 7.9)..... 48
Tabela 9 - Parâmetros estatísticos avaliados para peso de folhas, peso de vagens e biomassa seca total da parte aérea no processo de calibração do modelo CSM-CROPGRO-Soybean ao final do ciclo das cultivares..... 55
Tabela 10 - Duração do ciclo da cultivar de soja BRS 8980, simulado em função das datas de semeadura, correspondente aos municípios piauienses de Baixa Grande do Ribeiro, Bom Jesus, Currais, Monte Alegre do Piauí, Palmeira do Piauí, Ribeiro Gonçalves, Santa Filomena e Uruçuí..... 69
Tabela 11 - Duração do ciclo da cultivar de soja Domínio, simulado em função das datas de semeadura, correspondente aos municípios piauienses de Baixa Grande do Ribeiro, Bom Jesus, Currais, Monte Alegre do Piauí, Palmeira do Piauí, Ribeiro Gonçalves, Santa Filomena e Uruçuí..... 71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Água Disponível
AgMERRA	Conjunto de Dados de Forçamento Climático para Modelagem Agrícola
APSIM	Simulador de Sistemas de Produção Agrícola
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CPCE	Campus Professora Cinobelina Elvas
DSSAT	Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUA	Eficiência de Uso de Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBSNAT	Rede Internacional de Sites de Referência para Transferência Agrotecnológica
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MATOPIBA	Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PPGCA	Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias
RMSE	Raiz Quadrada do Erro Quadrado Médio
SPA	Secretaria de Política Agrícola
SPAD	Soil Plant Analysis Development
SWAP	Solo, Água, Atmosfera e Planta
UFPI	Universidade Federal do Piauí
USA	United States of América
VE	Emergência
VC	Cotilédone
VCU	Valor de Cultivo e Uso
ZARC	Zoneamento Agrícola de Risco Climático

LISTA DE SÍMBOLOS

º	Grau
'	Minuto
"	Segundo
cm	Centímetro
cm^{-3}	Centímetros cúbico
ºC	Grau Celsius
CO_2	Dióxido de carbono
Etc	Evapotranspiração da cultura
Eto	Evapotranspiração de referência
g	Grama
ha	Hectare
l	Litro
m	Metro
m^2	Metro quadrado
MJ	Mega joule
mm	Milímetro
ms^{-1}	Metro por segundo
m^{-3}	Metro cúbico
%	Porcentagem
K	Potássio
KCl	Cloreto de potássio
kg	Quilograma
kJ	Quilo joule
km	Quilômetro
kPa	Quilo Pascal
s	Segundo
t	Tonelada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 15

2 REVISÃO DE LITERATURA 18

2.1 Aspectos gerais da cultura da soja..... 18

2.2 Exigência climática da soja..... 20

2.3 Desenvolvimento e crescimento na cultura da soja..... 21

2.4 Produtividade de grãos de soja..... 22

2.5 Modelagem do crescimento e produtividade da soja..... 25

2.5.1 Modelo DSSAT..... 26

2.5.2 Calibração e validação do modelo DSSAT..... 29

2.5.3 Utilização do modelo DSSAT..... 31

3 MATERIAL E MÉTODOS..... 33

3.1 Calibração do modelo CSM-CROPGRO-Soybean para a estimativa de biomassa seca e rendimento de grãos de soja no cerrado do sudoeste piauiense..... 33

3.2 Avaliação do modelo CSM-CROPGRO-Soybean na estimativa do rendimento de grãos de soja no cerrado do sudoeste piauiense 40

3.3 Utilização do modelo CSM-CROPGRO-Soybean para estimar épocas de semeadura da soja no cerrado piauiense 43

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 47

4.1 Calibração do modelo CSM-CROPGRO-Soybean para a estimativa de biomassa seca e rendimento de grãos de soja no cerrado do sudoeste piauiense..... 47

4.2 Avaliação do modelo CSM-CROPGRO-Soybean na estimativa do rendimento de grãos de soja no cerrado do sudoeste piauiense 57

4.3 Utilização do modelo CSM-CROPGRO-Soybean para estimar épocas de semeadura da soja no cerrado piauiense 62

5 CONCLUSÃO 75

REFERÊNCIAS..... 76

1 INTRODUÇÃO

Na região Sudoeste do estado do Piauí, Brasil, a sojicultura se destaca como uma das principais atividades agrícolas, particularmente no bioma cerrado. Segundo Bohn et al. (2016), no Piauí, os satisfatórios níveis de produtividade de grãos alcançados pela cultura da soja no Cerrado, associados a incentivos econômicos e à perspectiva de melhoria na infraestrutura, faz da região uma das mais propicia para a cultura no Brasil.

O Piauí é detentor de uma significativa produção de grãos estimada em 6,69 milhões de toneladas. Dentre as culturas cultivadas no estado, a soja destaca-se como a de maior volume de produção, atingindo aproximadamente 3,5 milhões de toneladas. Na safra 2022/2023, a cultura foi beneficiada pelas boas condições climáticas, proporcionando um bom desenvolvimento das lavouras, constituindo em altas produtividades no estado, com média de 3.633 kg ha^{-1}. A área cultivada com a oleaginosa foi de 979,6 mil hectares (CONAB, 2023).

Segundo Barbieri et al. (2020), uma das principais causas que afetam as atividades agrícola, é a variabilidade climática. Particularmente, no Brasil a maior parte da variação da produção agrícola está relacionada com a variabilidade da precipitação pluviométrica. Assim, a escolha da data de semeadura é uma das maneiras econômica e eficaz para mitigar o efeito da deficiência hídrica nas culturas cultivadas em regime de sequeiro. Uma das maneiras de se recomendar épocas de semeadura é com a aplicação de simulações.

Nesse sentido, as previsões agrícolas por meio de ferramentas de simulação de crescimento e produtividade das culturas constituem-se uma importante ferramenta de planejamento para a agricultura. A produtividade e o crescimento das culturas podem ser caracterizados por meio de modelos biofísicos, tais como os presentes na plataforma de simulação DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) (HOOGENBOOM et al., 2019a).

A modelagem biofísica de sistemas agrícolas constitui-se em um conjunto de equações matemáticas que buscam expressar as relações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera. Os modelos da plataforma de simulação DSSAT são usados para simular sequências de culturas, rotação de culturas, bem como para estudar os resultados de diferentes práticas de manejo no crescimento, desenvolvimento e rendimento de culturas, considerando o balanço hídrico e os ciclos do carbono e nitrogênio no solo (LI et al., 2015). A plataforma modular do sistema conta com um módulo do solo, um módulo de cultura (que pode simular diferentes culturas através da definição de parâmetros específicos para cada espécie), um módulo gerador

de tempo (WGEN), e um módulo que simula a competição por recursos (ex., luz, água) pelas culturas, dentro do sistema solo-planta-atmosfera (CUADRA et al., 2018).

Antes da aplicação dos modelos, faz-se necessário a calibração e/ou a avaliação, que no caso dos modelos de crescimento de culturas agrícolas, consiste no concordância dos coeficientes genéticos do modelo, objetivando melhorar a concordância entre os valores previstos pelo modelo e os dados experimentais ou de áreas produtivas. Tipicamente, o processo de calibração requer a mensuração de medidas biométricas e fenológicas do crescimento e desenvolvimento da cultura por meio da realização de experimentos ou coletas de campo (SOUZA et al., 2017).

A avaliação do desempenho do modelo geralmente é realizada por meio de métricas e índices estatísticos, dentre esses destacam-se o coeficiente de correlação (r) e a raiz quadrada do erro quadrado médio (RMSE), os quais são usados para explicar se os dados simulados estão coerentes com os apresentados em relação aos dados observados (YANG et al., 2014).

Melo et al. (2020) enfatizam que, as informações do estudo de zoneamento agrícola de risco climático contribuem para subsidiar a formulação de novas políticas públicas voltadas ao aumento da sustentabilidade do cultivo da soja no bioma Cerrado. No presente estudo, realizaram-se simulações de produtividade de soja com base em uma janela de semeadura recomendada para a região (de 1º de novembro a 31 de janeiro), com o objetivo de identificar os padrões de déficit hídrico que afetam a cultura nas diferentes partes do cerrado do Sudoeste Piauiense. Desse modo, tornou-se possível realizar uma comparação entre as diferentes datas de semeadura, analisando as variações de produtividade e identificando as épocas mais favoráveis para a semeadura, quando os riscos climáticos são menores.

Para a cultura da soja, o modelo DSSAT CSM-CROPGRO-Soybean foi aplicado com bom desempenho na simulação do crescimento, desenvolvimento e produção da soja em diferentes ambientes tropicais (SILVA et al., 2021). Reis et al. (2020) concluíram que o modelo apresenta boa capacidade preditiva para a região do MATOPIBA. Contudo, o modelo ainda não foi calibrado e avaliado para as condições de solo e clima da região do cerrado do Sudoeste Piauiense.

A falta de dados de medidas biométricas e de rendimento em campo associados à medidas das condições ambientais, medidas agrometeorológicas e do solo, são essenciais para a calibração e avaliação dos modelos (RICHETTI et al., 2021), prévio a aplicação do modelo. De acordo com Melo et al. (2020), é evidente o progresso alcançado nos trabalhos de zoneamento agrícola, contribuindo significativamente para a sustentabilidade da atividade agrícola; no entanto, fazem-se necessário aprimorar o atual sistema de recomendação para a

cultura da soja, de modo a seguir as recentes mudanças nos cenários climáticos, agrícolas e socioeconômicos.

Portanto, esse estudo teve como objetivo, calibrar e avaliar o modelo DSSAT CSM-CROPGRO-Soybean na simulação do rendimento de grãos de soja visando a sua utilização para simular o rendimento de grãos e o crescimento de plantas de soja na região do cerrado do Sudoeste Piauiense com diferentes épocas de semeadura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais da cultura da soja

O desenvolvimento agroindustrial do Brasil, tem a cultura da soja como marco importantíssimo no processo. Sua influência é tão profunda, que é possível dividir esse processo em duas fases: antes (agricultura de subsistência) e depois da soja (agricultura empresarial). O estabelecimento da soja no Brasil foi um fator constituinte de desenvolvimento econômico e social (DALL´AGNOL, 2016).

De acordo com informações disponibilizadas pela empresa brasileira de pesquisa agropecuária, o Brasil é o país que possui a maior capacidade de expansão da área cultivada, podendo, a depender das necessidades de consumo do mercado do farelo (carnes) e do óleo (consumo doméstico, biodiesel e H-Bio), mais do que duplicar sua atual produção e, em curto prazo, forma-se no maior produtor e exportador mundial de soja e seus derivados. A soja (*Glycine max* (L) Merrill) é uma cultura pertencente à família Fabaceae, subfamília Papilionoideae, tribo Phaseoleae, gênero Glycine L., espécie max. É uma planta herbácea, da classe Rosideae, ordem Fabales. As principais variedades comerciais apresentam caule híspido, pouco ramificado e raiz com eixo principal e muitas ramificações (EMBRAPA, 2021).

Escher e Wilkinson (2019) destacam que a expansão significativa da produção de soja no Brasil é resultado da adoção de um conjunto de tecnologias, tais como sementes transgênicas, plantio direto e o uso de agroquímicos. No entanto, o fator decisivo que impulsionou esse crescimento foi a inserção de novas áreas para o cultivo, pois a taxa de expansão da área plantada foi substancialmente maior que o aumento da produtividade. Esse fenômeno também é responsável pela progressiva expansão geográfica da cultura da soja no país (Figura 1). Atualmente, a produção de soja já abrange cerca de 53% da área total destinada ao cultivo de grãos no Brasil.

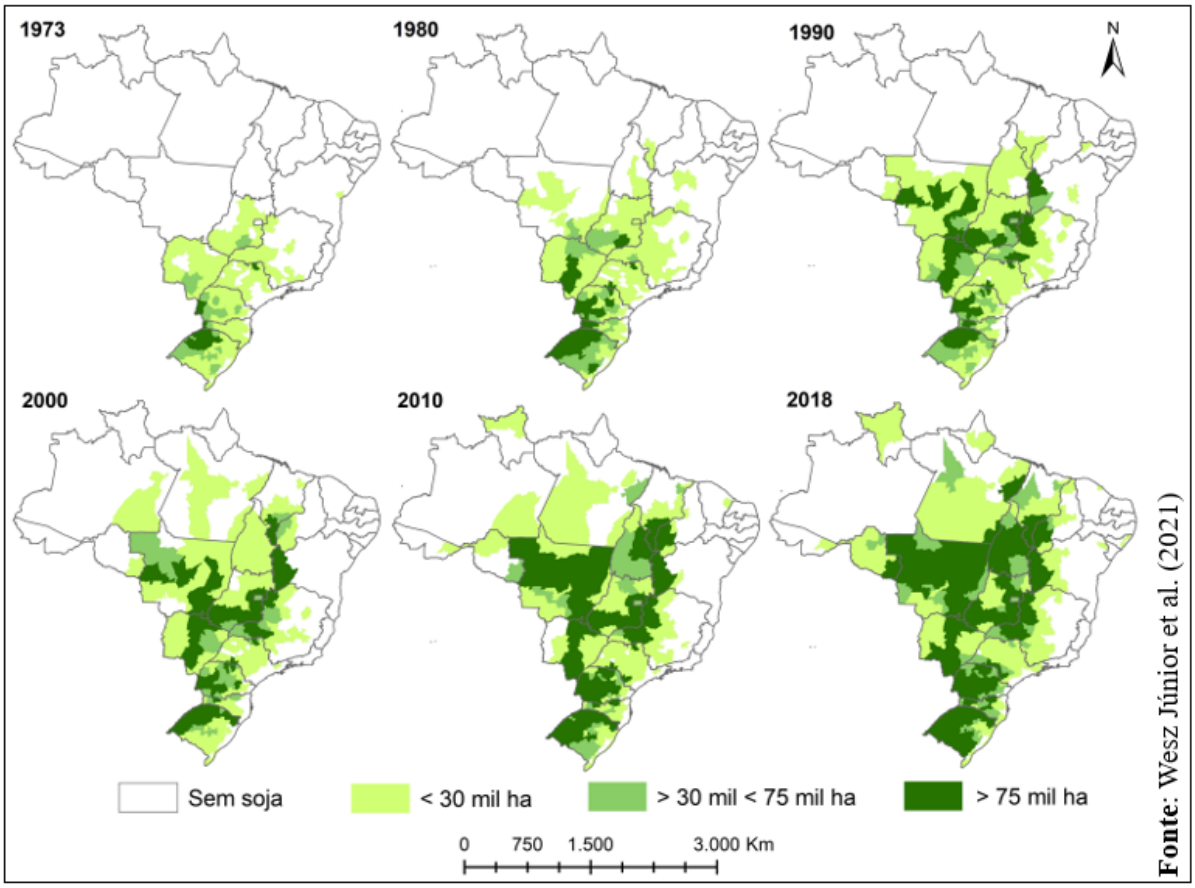


Figura 1 - Expansão geográfica da cultura da soja no Brasil entre 1975 e 2018.

Um aspecto relevante destacado pelos autores é o memorável avanço do cultivo de soja em direção ao Norte e ao Nordeste, particularmente na região conhecida como MAPITOBA, que é um acrônimo referente à área fronteiriça que abrange porções dos estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia. Nessa mesma linha, Wesz Júnior et al. (2021) evidenciam que nos últimos 18 anos, nas regiões mais "convencionais" de produção de soja, no Sul do país, onde o cultivo até pouco tempo encontrava-se inerte, observou-se uma nova fase de expansão e intensificação da produção. Segundo esses autores, curiosamente, o aumento mais instantâneo da produção de soja não foi observado nas regiões tradicionais, mas sim em novas áreas, num processo permanente de incorporação de novas superfícies à cadeia produtiva da soja.

Segundo dados do 10º Levantamento da Safra 2022/2023, realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), o Piauí apresenta uma significativa produção de grãos estimada em 6,69 milhões de toneladas. Dentre as culturas cultivadas no estado, a soja destaca-se como a de maior volume de produção, alcançando aproximadamente 3,5 milhões de toneladas. Segundo a companhia, a safra 2022/2023 foi favorecida pelas boas condições climáticas, proporcionando um bom desenvolvimento das lavouras e refletindo em altas

produtividades no estado, com média de 3.633 kg ha^{-1}. Neste levantamento, a área cultivada com a oleaginosa foi ajustada para 979,6 mil hectares.

O cerrado do Piauí, tendo em vista o avanço da produção no estado, é considerado a última fronteira agrícola do Brasil. O clima favorável associado a disponibilidade agrária coloca o estado em posição de competitividade, além da produtividade atingida. O processo de exploração do cerrado nesta região iniciou em meados de 1970, ganhando maior escala e profissionalização nos anos 2000. Atualmente, o Piauí é o terceiro maior produtor do Nordeste (LUZ et al., 2022). No entanto, os autores enfatizam que a produtividade de grãos de soja alinhada ao custo da terra, pode servir como indicador da migração dos produtores para esta região. Ao mesmo tempo, demonstra a necessidade de investimentos na região para atender essa mudança no escopo de produção de soja.

2.2 Exigência climática da soja

De todos os fatores de produção agrícola, o clima apresenta-se como o de mais difícil controle e de maior impacto sobre a obtenção de máximas produtividades. A aleatoriedade do clima confirma às adversidades climáticas, o principal fator de risco e de insucesso na exploração da agricultura. Certas adversidades climáticas, como a falta de água, podem, em alguns casos, ser total ou parcialmente amenizadas, porém, não se pode cultivar economicamente plantas não adaptadas ao clima. Ressalta-se que o estresses abióticos, como a seca, o excesso de precipitação, as temperaturas muito altas ou baixas, a baixa luminosidade, dentre outros, podem reduzir significativamente os rendimentos em lavouras e restringir as áreas onde espécies comercialmente importantes podem ser cultivadas (EMBRAPA, 2021).

A temperatura ideal para desenvolvimento e crescimento da soja, gira em torno de 30 ºC. Contudo, a cultura é adaptada a temperaturas entre 20 e 30 ºC. A disponibilidade adequada de água é crucial ao longo de todo o ciclo da cultura, mas os estágios de germinação-emergência, floração e enchimento de grãos são particularmente críticos nesse sentido. Para alcançar o máximo rendimento, a soja requer um total de água que variando entre 450 e 800 milímetros por ciclo, dependendo das condições climáticas, práticas de manejo e o tempo do ciclo da cultivar utilizada. Salienta-se que, além do estádio de desenvolvimento, o consumo de água pela cultura da soja depende da demanda evaporativa da atmosfera, e o seu valor absoluto

pode variar, tanto em função das condições climáticas de cada região como em função do ano e da época de semeadura (condições de tempo) na mesma região climática (EMBRAPA, 2021).

As condições climáticas ao longo do ciclo da cultura são os principais fatores responsáveis pela produção final de qualquer cultivo (SILVA et al., 2020a). De acordo com Oliveira et al. (2019), os elementos do tempo atmosférico como a radiação, precipitação, umidade e a temperatura são preponderantes em todas as fases fenológicas da cultura da soja, podendo afetar o desenvolvimento e a produtividade da cultura. Nesse sentido, Silva et al. (2020b) destacam que o cultivo da soja é extremamente dependente de elementos climáticos como disponibilidade hídrica, fotoperíodo e temperatura.

A soja é uma espécie classificada como de dias curtos, onde a sensibilidade ao fotoperíodo varia conforme as características de cada cultivar. Entretanto, o florescimento da cultura depende da duração e horas de luz em que a planta está exposta (SILVA et al., 2020b). Por esse motivo, a avaliação do efeito de variações climatológicas sobre a produção das culturas é fator fundamental para a previsão das safras (VIVAN et al., 2015). Sob essa perspectiva, Ferreira (2018) ao estudar modelos de simulação da produtividade da cultura da soja na região Centro-Sul do Paraná, concluiu que durante a fase vegetativa da cultura, as variáveis meteorológicas que mais influenciaram na produtividade da soja foram o fotoperíodo, a temperatura e a precipitação.

2.3 Desenvolvimento e crescimento na cultura da soja

Fehr e Caviness (1977) propuseram um sistema para classificar o desenvolvimento da soja em estágios vegetativos, representados pela letra "V", e estágios reprodutivos, representados pela letra "R". Com exceção dos estágios VE (emergência) e VC (cotilédone), as letras "V" e "R" são seguidas por índices numéricos que identificam estágios específicos nas duas fases do crescimento da planta. Nas cultivares de soja, é possível observar três padrões de crescimento: determinado, indeterminado e semideterminado. Segundo base de dados da Embrapa (2021), a maioria das cultivares brasileiras de soja são classificadas como de crescimento determinado.

Empenhos científicos, tem sido tema de vários autores, objetivando conhecer os estágios de desenvolvimento mais críticos para a determinação dos componentes de rendimento sob diferentes condições ambientais, a exemplo de Binoto et al. (2018). Esses autores relatam que a designação dos estádios de desenvolvimento da planta de soja é fundamental para a

implementação de sistema de produção eficiente, por meio do manejo adequado da lavoura, levando à obtenção de produtividades de grãos satisfatórios e à maximização dos recursos utilizados.

Zanon et al. (2016) observando o efeito do tipo de crescimento no desenvolvimento de cultivares modernas de soja após o início do florescimento no Rio Grande do Sul, concluíram que no período de sobreposição entre as fases vegetativa e reprodutiva, o crescimento em porte das plantas e a emissão de nós de R1 até R8 foram mais elevados para as cultivares com tipo de crescimento indeterminado em comparação com as de tipo determinado, e a amplitude desses valores diminuiu com o atraso na época de semeadura nas cultivares indeterminadas e praticamente não alterou nas determinadas.

Ao avaliar o desempenho agronômico de cultivares de soja com tipo de crescimento determinado em diferentes arranjos espaciais de plantas, Balbinot Júnior et al. (2015) destacam que o arranjo espacial de plantas interfere na competição intraespecífica e, consequentemente, na quantidade de recursos do ambiente – água, luz e nutrientes – disponíveis para cada planta. Os autores enfatizam que isso pode acometer expressivamente a produção de massa seca, a velocidade de fechamento das entre linhas, a severidade de doenças, a arquitetura das plantas e a produtividade de grãos da cultura.

Nesse contexto, destaca-se que a soja é uma cultura de vasto interesse econômico e presente em grande parte do estado do Piauí, tendo seu cultivo proeminente nas regiões do cerrado do estado. No entanto, a cultura ainda sofre com alterações causadas pelo déficit hídrico em seu desenvolvimento que compromete a sua produção, enfatizando a importância de alternativas para minimizar tais danos.

2.4 Produtividade de grãos de soja

O Brasil, com uma produção de soja que expandiu-se a uma taxa anual de crescimento de 25,1% entre as safras 2021/22 e 2022/23, com o volume de grãos passando de 125,5 para 154,5 milhões de toneladas no período, é o maior produtor de soja do mundo, superando os Estados Unidos, Argentina e China. Sua importância vem crescendo em todas as regiões do país, com rendimento médio superior a 2.800,00 kg ha^{-1} em todas as regiões (Tabela 1). A área plantada teve uma taxa de crescimento de 6.2% ao ano, passando de 41,4 para 44 milhões de

hectares. E a produtividade apresentou taxa anual de crescimento igual a 15,9% ao ano (CONAB, 2023).

Tabela 1 - Rendimento médio de soja das regiões do Brasil, safra 2023.

Região	Rendimento Médio (kg ha^{-1})	Área Plantada (ha)
Centro Oeste	3.684,00	20.078.059,00
Sudeste	3.697,00	3.489.163,00
Nordeste	3.657,00	4.041.783,00
Norte	3.314,00	2.720.258,00
Sul	2.877,00	13.258.073,00

Fonte: IBGE (2023).

A soja desempenha grande importância econômica para o Brasil, servindo como um substancial ocasionador de riquezas, empregos e divisas, se transformando em um dos fundamentais condutores de desenvolvimento regional do País (CARVALHO et al., 2023). Além de seu impacto econômico, a cadeia produtiva da soja representa papel social essencial, contribuindo para a economia local e regional, possibilitando o crescimento desenvolvimento do país e empregando milhares de pessoas ligadas direta ou indiretamente ao cultivo da soja. Porém, quando conduzida em condições inadequadas a cultura perde rendimento, conforme observado por Tsukahara et al. (2016), que analisaram a produtividade de soja em decorrência do atraso da colheita e de circunstâncias ambientais.

Resultados de pesquisa relacionados ao cultivo de soja em condições de cerrado têm mostrado que essa cultura apresenta boa produtividade nessas condições ambientais. Um exemplo é o estudo conduzido por Chagas Júnior et al. (2021), no qual eles avaliaram a produtividade da soja com tratamento de sementes em diferentes regiões do Cerrado brasileiro. Os autores observaram, que os resultados revelaram produtividade variando entre 2.196 e 5.706 kg ha^{-1}. Nessa mesma linha, Bottega et al. (2013) analisando em uma área situada no cerrado brasileiro, a variabilidade espacial e temporal da produtividade de soja, observaram que a máxima produtividade média durante três safras avaliadas foi de 5092,6 kg ha^{-1} enquanto a menor produtividade média foi de 2061 kg ha^{-1}.

No entanto, segundo Capone et al. (2016) a produtividade de grãos de soja é bastante influenciada pelo ambiente no qual ela é cultivada. Ao conduzirem uma análise que combinou abordagens paramétricas e não paramétricas para avaliar a estabilidade de cultivares de soja no Cerrado Tocantinense, esses pesquisadores constataram uma faixa média de produtividade

entre 1.102 e 2.987 kg ha^{-1} em quatro contextos distintos de estudo. Igualmente, as conclusões de Sediyama et al. (2015) ressaltam que uma série de fatores agrícolas exerce influência no desenvolvimento da cultura da soja.

Dentre esses fatores, destaca-se a data de semeadura como o principal contribuinte, determinando o período de exposição das plantas às flutuações climáticas. Silva et al. (2017), comparando os modelos DSSAT-CROPGRO- *Soybean* e o MAG adaptado, para realizar simulações de produtividade da cultura da soja atual e futura para a região de Piracicaba – SP, observaram produtividade final em massa seca, de 4.250 kg ha^{-1} e a simulada foi de 4.173 kg ha^{-1}.

Portanto, a escolha adequada da data de semeadura em relação à variedade cultivada desempenha um papel fundamental na determinação da produtividade de grãos (SILVA et al., 2018). Esse fato é corroborado com resultados obtidos por Bossolani et al. (2022), que avaliando três cultivares distintas de soja com diferentes ciclos fenológicos, semeadas em três épocas de plantio em condições de Cerrado, concluíram que a segunda data de plantio foi a época ótima para o cultivo da soja na latitude estudada, ocasionando em maior produtividade de grãos.

Assim, essa pesquisa demonstra a necessidade de manejar cuidadosamente o cultivo da soja, garantindo práticas adequadas para evitar perdas substanciais de produtividade. Ao fazê-lo, o Brasil pode continuar a aproveitar os benefícios econômicos e sociais que a soja oferece, consolidando sua posição como um dos principais motores de desenvolvimento regional e nacional.

Proeminentemente destaca-se que há uma pressão para encontrar um equilíbrio entre o aumento da produtividade agrícola e a preservação da qualidade do agroecossistema, para atender à crescente demanda por alimentos, que ocorre paralelamente à demanda por serviços ambientais para a sociedade. As decisões de uso e manejo do solo são influenciadas por outras demandas da sociedade, que incluem não só a produção imediata de grãos, fibras, energia ou outros produtos, mas também uma produção sustentável. Esta abordagem visa garantir a sustentabilidade de sistemas capazes de suportar seres humanos, animais e plantas, alinhados com os princípios de qualidade do solo, conforme destacado por Serafim et al. (2019).

2.5 Modelagem do crescimento e produtividade de grãos da soja

A modelagem de sistemas agrícolas pode ser descrita como um conjunto de representações matemáticas ou de equações que buscam expressar as relações que ocorrem num sistema real. Um elevado número de processos e um alto grau de complexidade entre seus componentes podem ser descritos e simulados através dessas equações, fornecendo ferramentas confiáveis para a predição de eventos físicos, químicos e biológicos (FERREIRA, 2018). Os modelos de simulação de culturas são ferramentas importantíssimas nos estudos das interações e mudanças no clima e os seus efeitos sobre os diversos cultivos e os possíveis impactos dessas mudanças nas condições ambientais sobre a produtividade (ASSENG et al., 2015).

Os modelos de simulação de sistemas agrícolas têm sido utilizados na literatura cientifica para análise das consequências das mudanças climáticas na agricultura, o que pode fornecer cenários agrícolas futuros aos diferentes setores da sociedade envolvidos no tema, permitindo avaliar com a devida antecedência a vulnerabilidade do sistema e oferecer subsídio para adaptação tecnológica do setor (ASSENG et al., 2013). Percebe-se, portanto, que os modelos desempenham papel fundamental na facilitação da compreensão e avaliação das relações que afetam as culturas, conforme destacado por Dokoohaki et al. (2016). De acordo com esses autores, tais relações envolvem diversos fatores, como a época de semeadura, a escolha das cultivares, as taxas de semeadura, a natureza do solo, as estratégias de fertilização, os padrões de irrigação e os fenômenos climáticos sazonais.

Além disso, a aplicação de métodos de modelagem agronômica, que vinculem dados climáticos à expectativa de crescimento vegetal, outorga, por exemplo, elaborar estratégias de convivência da espécie com fatores abióticos (BENDER et al., 2020), além de que o uso de modelos que representem melhor esta relação clima-crescimento-produção auxiliam na gestão da safra, no desenvolvimento de estratégias de adequação, como no caso das mudanças climáticas, no qual a antecipação do efeito de altas temperaturas nas fases fenológicas logra exibir respostas negativas ou positivas (LUO et al., 2014).

A utilização de modelagem matemática, que permite a definição dos processos compreendidos no sistema e a simulação de senários que auxiliam na tomada de decisões no manejo da planta, como uso de fertilizantes, irrigação, aplicação de fungicidas, entre outros, é uma importante ferramenta para o conhecimento do desenvolvimento, crescimento e produtividade de uma cultura (BENDER et al., 2020). Rosenzweig et al. (2014) destacam que

a utilização de ferramentas de modelagem agrícolas baseadas em processos é cientificamente aceita para examinar as consequências da mudança climática na agricultura.

Conforme afirmam Dourado Neto et al. (1998), além da importância científica, das simulações práticas, a modelagem ainda proporciona a elaboração de políticas agrícolas e de zoneamento, além dos vários ramos de atividade agrícola. Os autores ressaltam que há uma ideia de que um modelo possa fornecer o conhecimento que não se tem sobre um sistema, pelo contrário, o intuito da modelagem é produzir uma ferramenta que possa ser usada para testar hipóteses, gerar hipóteses alternativas, refutá-las, sugerir experimentos e, ademais, prever o comportamento do sistema em situações desconhecidas.

Em modelagem de culturas agrícolas, a compreensão dos processos biofísicos e interações com metodologias no sistema de produção agrícola são fundamentos para a modelagem e, com esses princípios, vários sistemas de suporte a decisão agem como meios de suporte ao gerenciamento de um setor agrícola (MARIN, 2016). Inúmeros modelos estão disponíveis para prever o crescimento das culturas, dentre eles destaca-se o Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia - DSSAT, o simulador de sistemas de produção agrícola - APSIM e Solo, Água, Atmosfera e Planta - SWAP (OVANDO et al., 2018).

2.5.1 Modelo DSSAT

O DSSAT – Decision Support System for Agrotechnology Transfer (*Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia*) é um conjunto de programas independentes que operam em conjunto. É composto por 28 modelos de culturas, inseridos numa ferramenta que facilita a criação e o gerenciamento de arquivos de experimentos, de solo e de clima. É um modelo de sistema de cultivo que reproduz o desenvolvimento e crescimento de uma cultura ao longo do seu período de crescimento, assim como a água do solo, práticas de manejo e processos de carbono (JONES et al., 2003).

O modelo do sistema de cultivo DSSAT é usado para simular sequências de culturas ao longo de vários anos, como ocorreria nas rotações das culturas, e também é usado para estudar os efeitos ao longo prazo de diferentes práticas de manejo no crescimento, desenvolvimento e rendimento de uma cultura, como os processos de água, carbono e nitrogênio no solo (LI et al., 2015). Esse modelo surgiu da Rede Internacional de Sites de Referência para Transferência Agrotecnológica (IBSNAT) na década de 1980.

Segundo Jones et al. (2017), o DSSAT é um dos modelos mais amplamente utilizados no mundo. Pode ser aplicado para gerar dados estocásticos de produtividade para diferentes cultivos, com vistas à aplicação na decisão sobre estratégias de produção. Este produto foi desenvolvido com uma estrutura modular para facilitar sua manutenção e incluir componentes adicionais para simular sistemas de cultivo, considerando diferentes solos, climas e condições de manejo. O DSSAT contém o módulo de crescimento de plantas CROPGRO para grãos de leguminosas, particularmente soja (*Glycine* max L. *Merr.*) e outros para milho (*Zea mays* L.), arroz (*Oritza sativa* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.) (HOOGENBOOM et al., 2015).

A estrutura do DSSAT (Figura 2) é composta de uma coleção de programas independentes que interagem entre si. Os módulos primários (solo, clima e planta), que simulam individualmente os vários processos que afetam a unidade de terra, incluindo o tempo, o crescimento das plantas, processos do solo, práticas de ambiente solo-planta de interface e manejo. Já os submódulos são níveis adicionais de módulos primários, como o Cropgro, Nitrogênio, Irrigação, Doenças e Pragas (JONES et al., 2010).

Conforme mostrado na Figura 2, cada módulo possui seis etapas operacionais (inicialização da execução, inicialização da temporada, cálculos de taxas, integração, produção diária e saída resumida). O programa principal controla o tempo dos eventos: início e término da simulação, início e fim da safra, bem como ciclos temporais diários. Esse recurso, permite que cada módulo leia suas próprias entradas, inicialize-se, calcule taxas, integre suas próprias variáveis de estudo e escreva saídas de forma totalmente independente da operação de outros módulos (JONES et al., 2010).

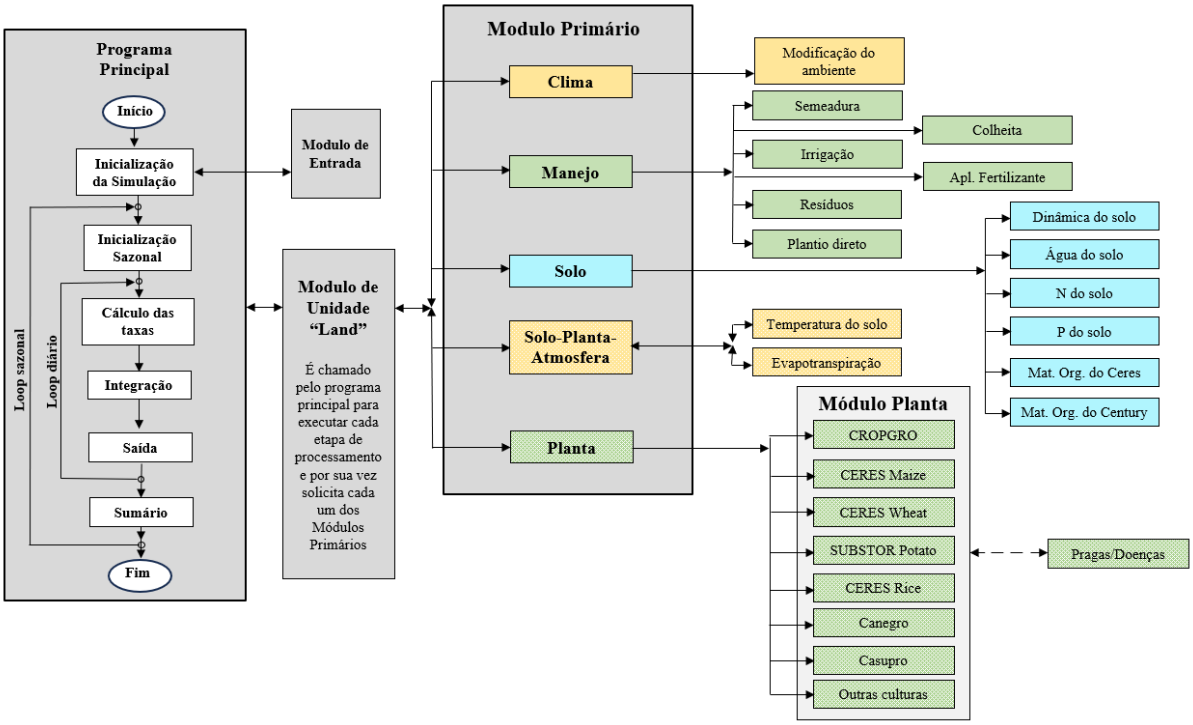


Figura 2 - Visão geral dos componentes e estrutura modular do CSM-DSSAT. Fonte: adaptado de Jones et al. (2010).

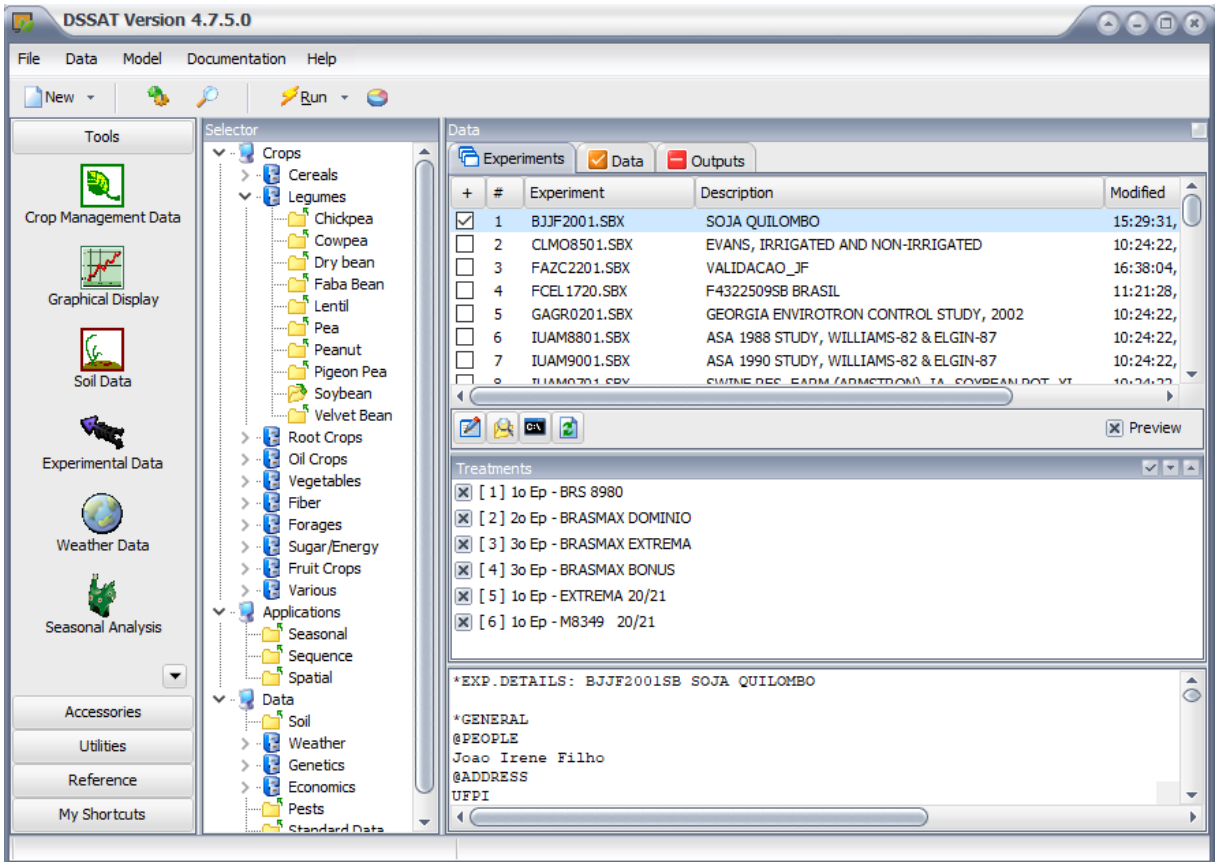


Figura 3 - Visão geral do Sistema de Apoio à Transferência de Agrotecnologia (DSSAT).

Destaca-se ainda que, o Sistema de Apoio à Transferência de Agrotecnologia (DSSAT) é uma plataforma de aplicação de software, sendo que dentro deste há os modelos de simulação de crescimento de culturas, para mais de 42 culturas (a partir da Versão 4.8), com ferramentas que facilitam o uso efetivo dos modelos (Figura 3). Essas ferramentas incluem programas de gerenciamento de banco de dados para solo, clima, gerenciamento de culturas e dados experimentais, utilitários e programas aplicativos. O pacote DSSAT fornece modelos de 42 culturas com novas ferramentas que facilitam a criação e o gerenciamento de arquivos de dados experimentais, de solo e meteorológicos (JONES et al., 2003; HOOGENBOOM et al., 2019a; HOOGENBOOM et al., 2021).

As informações de solo inclusas na plataforma são de solos dos EUA (região onde o programa foi desenvolvido). Entretanto é possível cadastrar outros dados de solos no banco de dados, com amostras de solo contendo dados químicos, físicos e estruturais. Dentro da plataforma DSSAT, o submódulo Cropgro analisa os processos de crescimento de culturas, incluindo; fenologia, fotossíntese, nitrogênio na planta e a assimilação de carbono, particionamento de fotoassimilados, e danos como doenças e pragas, este ainda tem um submódulo de fenologia como o Soybean, que é específico para a soja (JONES et al., 2003; HOOGENBOOM et al., 2019a; HOOGENBOOM et al., 2021).

Os modelos de cultivo requerem dados climáticos diários, informações de superfície e perfil do solo e manejo detalhado da cultura como insumos. As informações genéticas das culturas são definidas em um arquivo de espécies de culturas que é fornecido pela DSSAT e informações de cultivares ou variedades devem ser fornecidas pelo usuário. As simulações são iniciadas no plantio ou antes do plantio através da simulação de um período de estabilização. Essas simulações são realizadas em uma etapa diária ou, em alguns casos, em uma etapa de tempo horária, dependendo do processo e do modelo de cultivo. Ao final de cada dia, são atualizados os balanços de água, nitrogênio, fósforo e carbono da planta e do solo, bem como o estágio de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura.

2.5.2 Calibração e validação do modelo DSSAT

Devido à complexidade na compreensão dos fatores do sistema solo-planta-atmosfera, os modelos de crescimento de culturas se estabelecem como ferramentas eficazes na avaliação dos impactos das práticas de manejo agrícola no crescimento e na produtividade das culturas

(VIANNA; SENTELHAS, 2016). Dessa forma, a aplicação de modelos capazes de simular o desenvolvimento e o crescimento das plantas emerge como uma opção importante para avaliação de culturas de relevância comercial (LIMA FILHO et al., 2013).

Contudo, a utilização de modelos de crescimento de plantas em ambientes diferentes da região onde eles foram desenvolvidos exige testes e adaptações, em virtude das diferenças de características genéticas das culturas, clima e solo (NASSIF et al., 2012). Como ressaltado por Mekonnen et al. (2020), é de suma importância o desenvolvimento de ensaios buscando a calibração e validação para novos locais e cultivares bem como a aquisição de dados climáticos confiáveis. Essa abordagem visa mitigar quaisquer extrapolações inadequadas que possam ocorrer.

Os modelos de cultivo são calibrados por meio da utilização de dados experimentais obtidos em campo. Esses dados permitem a estimativa do potencial de rendimento das culturas, sem considerar limitações tanto de natureza biótica quanto abiótica. Além disso, é possível prever os rendimentos alcançáveis, levando em conta apenas as limitações de natureza biótica, conforme apontado por Teixeira et al. (2019). Uma alternativa, consiste em empregar os rendimentos obtidos a partir de experimentos conduzidos em campo ou os rendimentos mais bem-sucedidos obtidos por agricultores em uma região específica como ponto de referência. A partir desse referencial, é possível quantificar a discrepância nos rendimentos resultantes das diferentes práticas de manejo adotadas por outros agricultores (EGLI; HATFIELD, 2014).

Estudos como o realizado por Salmerón e Purcell (2016) indicam que o uso de coeficientes fenológicos genéricos sem necessidade de calibração tem amplas aplicações para ampliar o uso do modelo DSSAT-CROPGRO-Soybean como ferramenta de decisão, para produtores e para estudos agronômicos que analisam possíveis rotações, grupo de maturidade e datas de semeadura. Ao investigar a precisão do modelo DSSAT na simulação do desenvolvimento da soja, utilizando um conjunto genérico de coeficientes fenológicos com base no grupo de maturidade relativa e no hábito de crescimento da planta (determinado vs. indeterminado), Salmerón et al. (2017) constataram que o modelo apresentou precisão semelhante às previsões obtidas com coeficientes específicos da cultivar.

Entende-se, portanto, que ao empregar ferramentas de tomada de decisão calibradas e avaliadas para uma região específica, tendo em vista a otimização dos sistemas de cultivo, é possível aprimorar as melhores estratégias de manejo agrícola. Nesse contexto, a modelagem surge como uma alternativa capaz de impulsionar a produtividade da cultura da soja. Por exemplo, Battisti e Sentelhas (2019) utilizaram o modelo DSSAT para caracterizar as áreas de cultivo de soja no Brasil, com base em padrões de escassez hídrica. Os autores concluíram que

a classificação das zonas ambientais ajudou a identificar regiões com níveis de produtividade atingíveis e padrões de déficit hídrico semelhantes, o que pode ser útil tanto na avaliação das estratégias de manejo da cultura quanto nos programas de aprimoramento genético da soja em relação à sua tolerância à seca.

2.5.3 Utilização do modelo DSSAT

Modelos de cultivo, como o Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), podem contribuir na análise e otimização do cultivo da soja. Esses modelos abrangem uma variedade de áreas, incluindo o manejo da cultura, o melhoramento genético, a gestão da água e a avaliação das consequências das alterações climáticas na produção de soja (HOOGENBOOM et al., 2019b). Além disso, esses modelos desempenham um papel fundamental em estudos voltados para o gerenciamento de riscos climáticos e no fortalecimento da resiliência dos sistemas de cultivo de soja (ELIAS et al., 2019).

Considerando as informações expostas acima, vale a pena analisar os impactos das mudanças climáticas em todas as zonas agroecológicas, visando preparar-se para futuras adaptações às condições climáticas. A avaliação dos efeitos do clima, tanto diretos quanto indiretos, sobre a produtividade, seja em uma única propriedade agrícola, em uma região específica ou em escalas mais amplas, requer a implementação de modelos integrados capazes de considerar as complexas interações que ocorrem no sistema. Para isso, diferentes abordagens de adaptação às mudanças climáticas devem ser organizadas em associação com outras informações científicas. Além disso, é crucial o engajamento de partes interessadas, garantindo sua participação nas iniciativas de apoio e extensão agrícola (AWAN et al., 2021).

Diversos estudos abrangendo a utilização de modelos de crescimento de culturas já foram conduzidos com o propósito de contribuir com a previsão do fornecimento de soja ao longo do tempo. Utilizando-se do modelo DSSAT/CROPGRO para realizar medida e estimada da umidade volumétrica do solo para o cultivo de soja, Fattori Junior et al. (2017) concluíram que o módulo do balanço hídrico do solo do modelo DSSAT/CROPGRO conseguiu explicar em torno de 60% dos totais de umidade volumétrica do solo, tanto para as profundidades de 0,2 metros quanto para 0,5 metros.

Silva et al. (2017), com o objetivo de simular os dados de produtividade da cultura da soja, tanto para as condições atuais quanto para as futuras na região de Piracicaba, São Paulo, utilizando o modelo DSSAT-CROPGRO-Soybean e considerando as implicações das

mudanças climáticas, os resultados apontaram para uma redução na produtividade quando apenas o aumento da temperatura foi considerado. No entanto, quando incorporados o aumento do acúmulo de dióxido de carbono (CO_2) nas simulações, observou-se um acréscimo na produtividade da soja para a mesma região.

Nesse contexto, Ovando et al. (2018), ao investigarem a precisão do modelo DSSAT na estimativa da produtividade da soja com base em dados meteorológicos obtidos por satélite, constataram que a produtividade das culturas é diretamente influenciada pelas variações na intensidade e na acumulação sazonal dos fatores meteorológicos no decorrer do ciclo de crescimento das plantas. Salienta-se, que o modelo DSSAT desempenha um papel crucial não apenas na definição de estratégias para prever o rendimento de grãos de soja, mas também para determinação das épocas ideais de semeadura para essa cultura em uma determinada região.

Um estudo conduzido por Barbieri et al. (2020) com o objetivo de analisar a época mais apropriado para a semeadura da soja, levando em consideração a variabilidade na produtividade de três variedades de soja em relação às condições climáticas associadas aos anos de La Niña, El Niño e condições neutras, realizado no estado de Mato Grosso, revelou importantes percepções. Os resultados deste estudo destacaram que a semeadura antecipada da soja implica em um considerável risco de queda na produtividade. Por outro lado, cultivares semeadas mais tardiamente demonstraram rendimentos superiores à média estadual. Assim, os autores observaram que semeaduras realizadas a partir de 10 de outubro são as mais recomendadas para obter os resultados mais favoráveis na cultura da soja.

Battisti, Bender e Sentelhas (2019) empregaram o modelo CSM-CROPGRO-Soybean para a avaliação da concordância entre dois bancos de dados meteorológicos e dados climáticos observados, a fim de simular o desenvolvimento e a produtividade da soja no Brasil. Os resultados obtidos indicaram que os bancos de dados AgMERRA e XAVIER GWD demonstraram eficácia na simulação dos estágios vegetativos e reprodutivos da cultura da soja, bem como na estimativa das produtividades potenciais e alcançáveis. Adicionalmente, esses bancos de dados conseguiram representar adequadamente a variabilidade ao longo das safras de soja.

No Brasil, a cultura da soja ocupa a maior parcela da área de cultivo de grãos (DIAS et al., 2016), desempenhando papel fundamental no crescimento da área cultivada. Portanto, a importância do setor agrícola para o país exige a necessidade de avanços no aprimoramento dos estudos de modelos agrometeorológicos e agroeconômicos desenvolvidos nas últimas décadas, como objetivo de avaliar a produtividade das culturas agrícolas (ROSENZWEIG et al., 2013), tornando-os cruciais para a contínua prosperidade da agricultura brasileira.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Essa pesquisa teve início na safra 2019/2020, com três datas de semeadura planejadas, as quais seriam repetidas na safra 2020/2021 para a calibração e avaliação do modelo DSSAT. No entanto, em função da impossibilidade de obter dados referentes a colheita da soja no segundo ano agrícola, adotou-se a metodologia de utilizar parâmetros coletados em ensaios de Valor de Cultivo e Uso (VCU) da soja conduzidos pela Embrapa Meio Norte durante as safras 2016/2017 a 2019/2020.

Portanto, o trabalho seguiu a seguinte cronologia: primeiro, foi conduzido um ensaio na safra 2019/2020 para coletar os dados necessários à calibração do modelo. Em seguida, os dados dos ensaios de VCU foram utilizados na validação do modelo. Por fim, o modelo, já calibrado e validado, foi empregado para simular o rendimento de grãos de soja semeada em diferentes datas, em regime de sequeiro, ao longo de 30 safras, em oito municípios da região Sudoeste do Estado do Piauí. Estes passos serão detalhados nos tópicos a seguir.

3.1 Calibração do modelo CSM-CROPGRO-Soybean para a estimativa de biomassa seca e rendimento de grãos de soja no cerrado do sudoeste piauiense

Os dados foram coletados em ensaios conduzido em uma fazenda localizada na Serra do Quilombo, a 60 km da cidade de Bom Jesus, Piauí (latitude - 9º16'20,3" S, longitude - 44º44'56,9" O e altitude 620 m), durante a safra 2019/2020 (Figura 4). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw tropical de savana, com característica de subúmido quente de outubro a março (estação chuvosa), e de tropical semiárido quente, entre abril e setembro (estação seca) (ANDRADE JÚNIOR et al., 2005).

Os registros diários de precipitação pluvial (mm) foram obtidos de um pluviômetro automático instalado na área experimental. Os dados climáticos diários de temperatura do ar (ºC) e umidade relativa do ar (%) foram coletados por uma estação agrometeorológica automática instalada na Fazenda Colorado, localizada a 2,0 km da área experimental. As informações climáticas de velocidade do vento (ms^{-1}) e radiação solar ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$), foram obtidas do banco de dados da NASA, por meio do modulo *Nasa Power* (NASA, 2021).

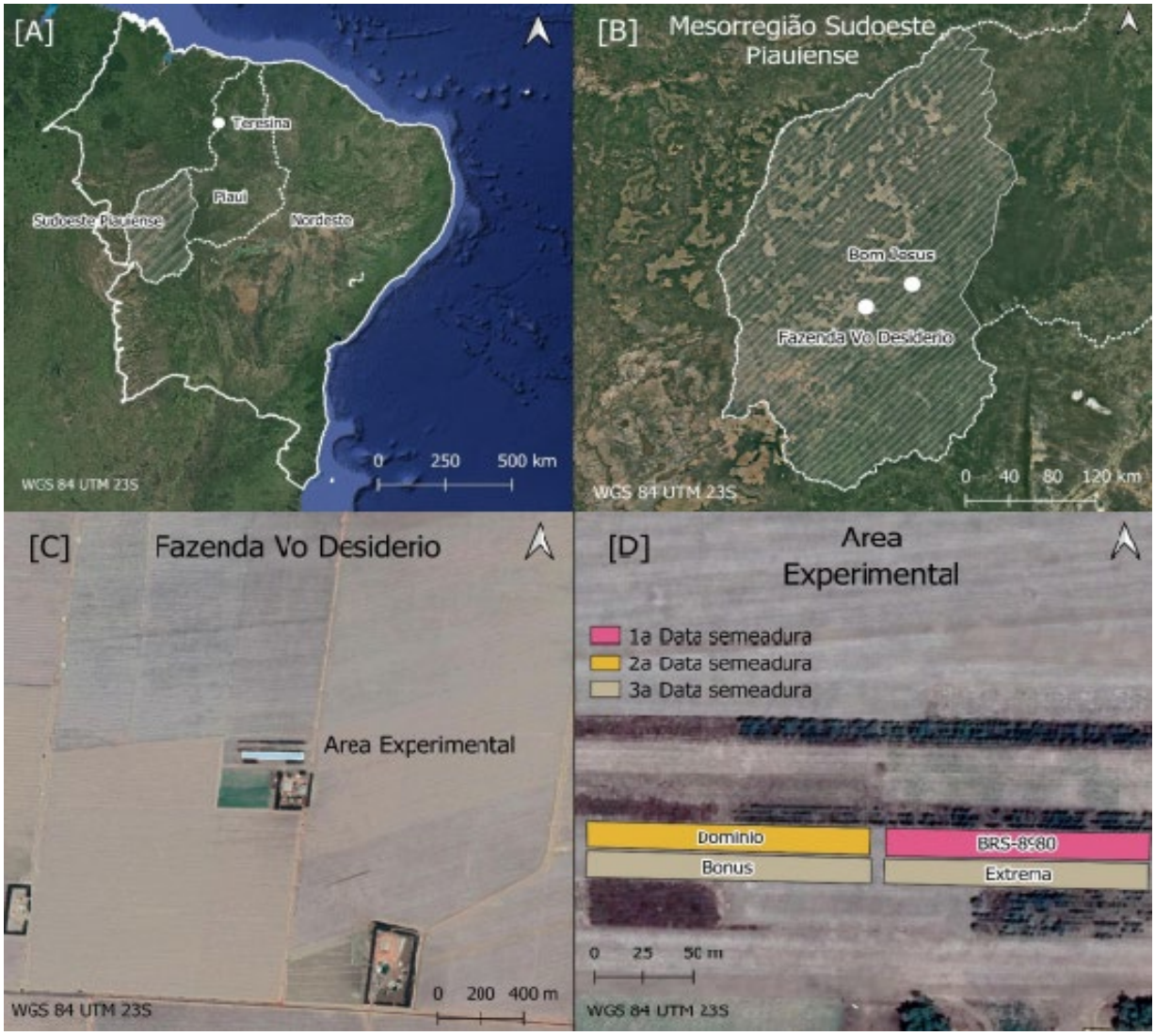


Figura 4 - Localização da área experimental destacando a mesorregião Sudoeste Piauiense (A, B), a Fazenda Vô Desiderio (C) e o local de realização dos ensaios (D). Serra do Quilombo, Bom Jesus, PI.

O solo da área experimental, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, é um Latossolo Amarelo Distrófico argissólico (PRAGANA et al., 2016). As características físicas e químicas do solo são apresentadas na Tabelas 2. Os procedimentos relacionados ao controle fitossanitário seguiram as recomendações técnicas para a cultura da soja na região adotadas pelo proprietário da fazenda. A adubação da soja foi realizada no plantio com superfosfato simples na linha (400 kg ha^{-1}) e 160 kg ha^{-1} de KCl aplicado a lanço.

Tabela 2 - Análise física e química do solo da área experimental na Fazenda Vô Desidério, município de Bom Jesus, Piauí.

Profundidade	**MO**	**pH**	**P**	**K**	**Al**	**H+Al**	**Areia**	**Silte**	**Argila**
m	g dm^{-3}	água	mg dm^3	------- ($cmol_c$ dm^3) --------				%	
0,00-0,10	29,10	5,99	76,85	0,27	0,07	2,91	75,57	5,35	19,08
0,10-0,20	15,30	5,29	47,02	0,19	0,07	3,24	75,13	1,92	22,95
0,20-0,40	9,00	5,04	2,85	0,15	0,07	2,27	76,10	2,21	21,69
0,40-0,60	7,60	4,47	0,97	0,07	0,07	1,87	71,68	3,79	24,54

Utilizou-se quatro cultivares de soja, em três datas de semeadura, cujas características de hábito de crescimento e grupo de maturidade encontram-se na Tabela 3. As cultivares avaliadas foram: (1) BRS 8980 IPRO (BRS 8980), que apresenta rusticidade elevada, produtividade, tolerância às principais doenças da soja na região e ciclo apropriado às condições agroclimáticas do MATOPIBA (EMBRAPA, 2019); (2) BMX 84I86 (Domínio), grupo de maturação 8.4, alto potencial produtivo, porte e ciclo adequados ao MAPITOBA, hábito de crescimento indeterminado e índice de ramificação baixo; (3) BMX 81I81RSF IPRO (Extrema), grupo de maturação 8.1, hábito de crescimento indeterminado, alto potencial produtivo e alta adaptação para MAPITOBA; e (4) BMX 8579 IPRO (Bônus), grupo de maturação 7.9 alto potencial produtivo, desenvolvimento inicial rápido, hábito de crescimento indeterminado e índice de ramificação moderado (BRASMAX, 2021) (Figura 5).

Tabela 3 - Cultivares, grupo de maturidade, datas de semeadura, maturação fisiológica e colheita do experimento de campo safra 2019/2020.

Cultivar	Hábito de Crescimento	Grupo de maturidade	Data de semeadura	Data de maturação fisiológica	Data de colheita
BRS8980	Determinado	8,9	29/11/2019	06/04/2020	17/04/2020
Domínio	Indeterminado	8,4	14/01/2020	29/04/2020	06/05/2020
Extrema	Indeterminado	8,1	30/01/2020	06/04/2020	13/05/2020
Bônus	Indeterminado	7,9	30/01/2020	29/04/2020	06/05/2020

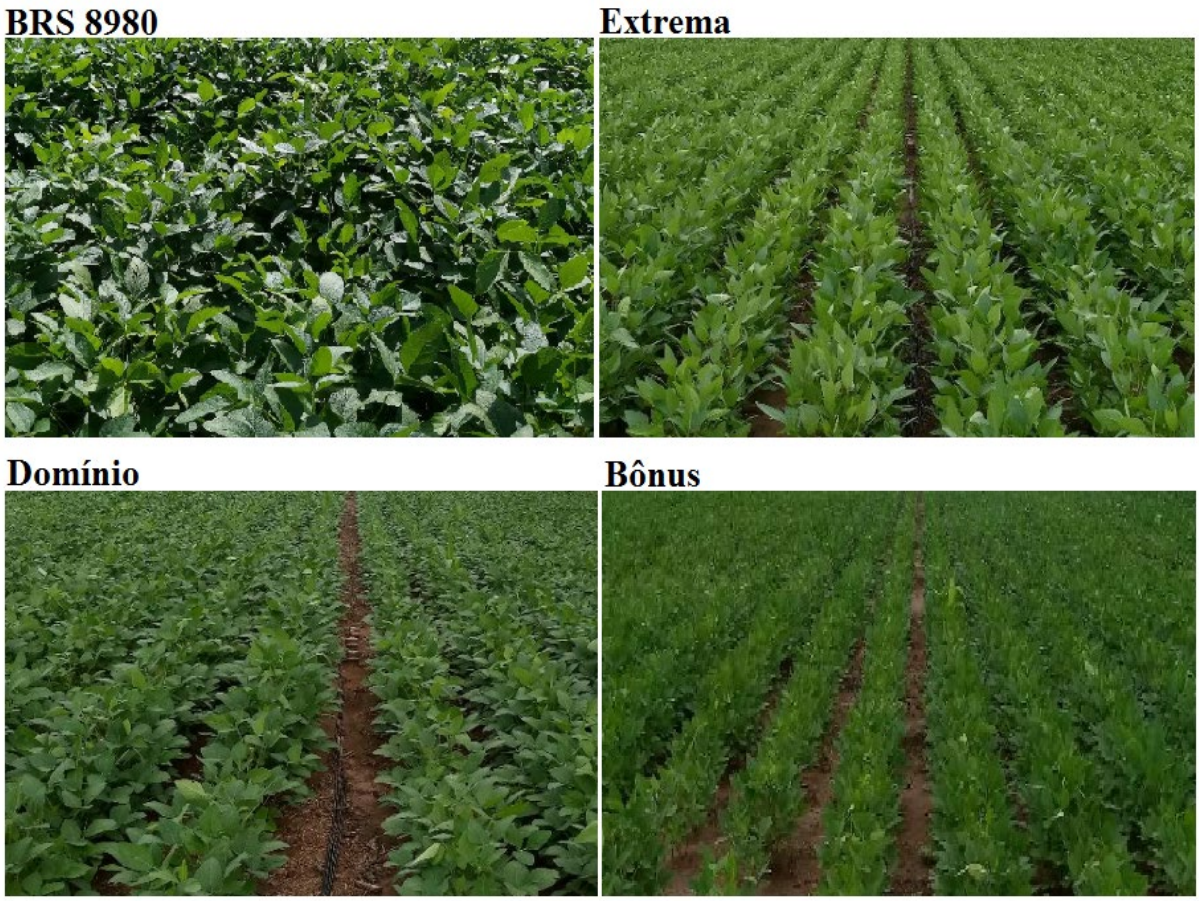


Figura 5 - Imagens das cultivares de soja avaliadas, no campo experimental.

As cultivares foram semeadas em blocos com dimensões de 15 m x 100 m, que tiveram suas áreas divididas em duas partes iguais (subáreas de 15 m x 50 m) (Figura 6A). Em uma delas foram efetuadas as retiradas quinzenais de plantas para as medições dos parâmetros de produção e dos componentes de produção, por ocasião da colheita, e na outra foram coletadas as plantas para as medidas de crescimento. Dentro da área destinada à medição dos parâmetros de produção, foram selecionadas e demarcadas com piquetes e barbantes, quatro áreas com quatro fileiras de plantas com cinco metros de comprimento cada (parcelas).

Foram instalados sensores de umidade, Campbell CS616, nas profundidades de 0,0-0,3 m, 0,3-0,6 m, 0,6-0,9 m e 0,9 a 1,2 m (Figura 6C), para realização do monitoramento do conteúdo de água no solo. Os dados de umidade do solo foram registrados e armazenados em um datalogger, Campbell CR1000X, instalado no centro da área experimental, os quais foram transferidos semanalmente com auxílio de um notebook.

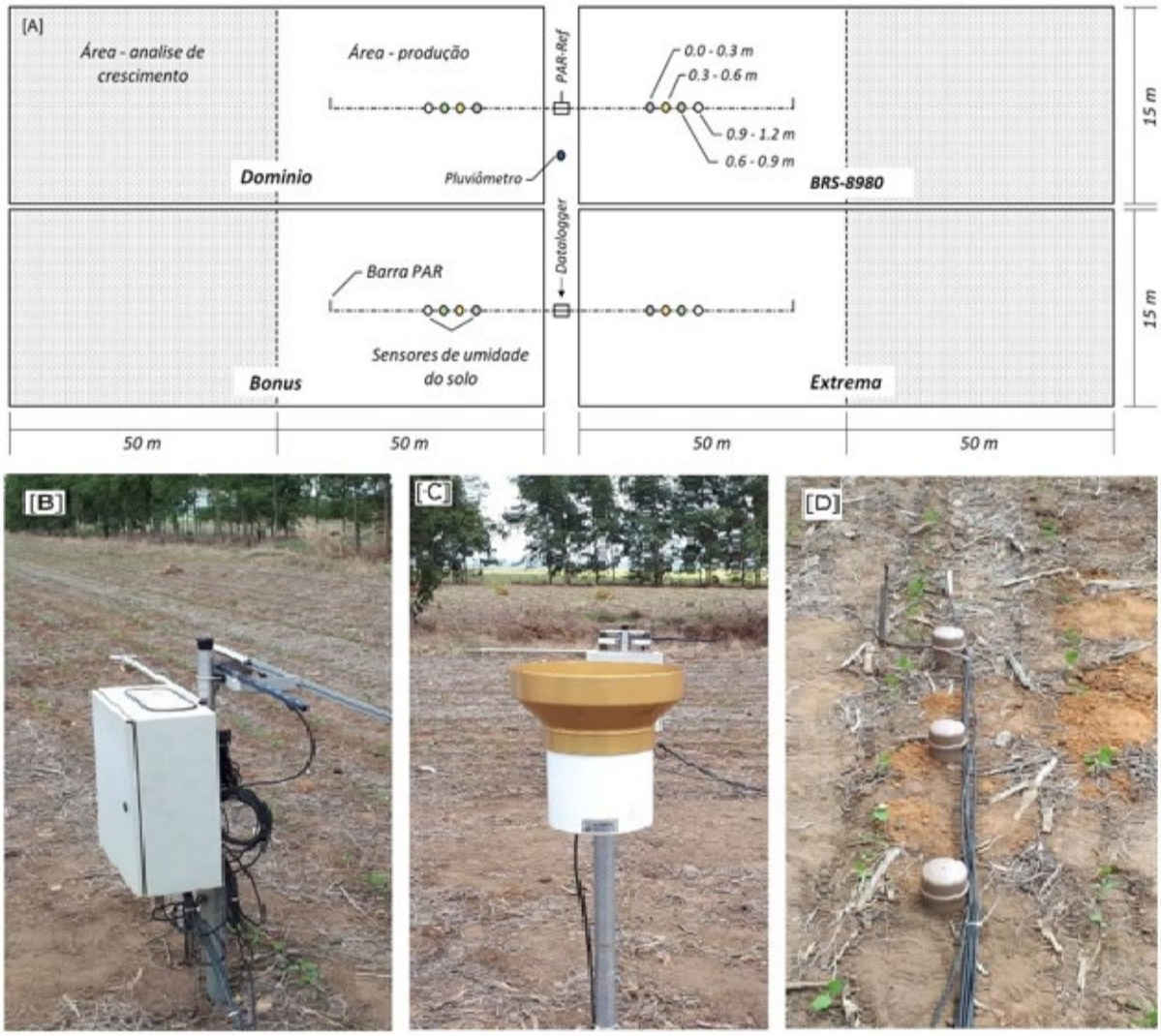


Figura 6 - Croquis da área experimental (A) e detalhes da caixa central com datalogger (B), pluviômetro (C) e sensores de umidade do solo (D) instalados no ensaio. Serra do Quilombo, Bom Jesus, PI.

Durante o período de crescimento das plantas de soja foram registradas as datas dos estágios de desenvolvimento fenológico segundo a escala de Fehr e Caviness (1977), como: datas de emergência, início da floração (R1), florescimento pleno (R2), início do desenvolvimento das vagens (R3), início do enchimento de grãos (R5) e maturidade fisiológica (R7) quando 50% das plantas atingiam esse estágio específico.

Para a caracterização da curva de crescimento, efetuou-se coletas quinzenais de plantas de soja para determinar a biomassa seca aérea total e seu fracionamento ao longo do ciclo de crescimento, nos seus diferentes órgãos componentes (folha, caule, vagem e grãos). Foram coletadas plantas de um metro linear dentro de cada faixa de plantio das cultivares, com quatro repetições; as plantas foram imediatamente pesadas, seus órgãos foram separados em folhas, ramos e vagens, colocados em sacos de papel. E em seguida o material foi levado para

laboratório e seco em estufa de ventilação forçada, a 65 ºC, durante 48 h, com posterior pesagem da massa seca.

Por ocasião da colheita, foram determinados os seguintes componentes de produção: Estande final (EF) – obtido pela contagem do número total de plantas de cada parcela; Altura das Plantas (AP) – obtida através de medidas das plantas por meio de uma trena, desde o nível do solo até a última vagem na haste principal; Número de nós na haste principal da planta (NNH); Número de vagens por planta (NVP) - obtido pela contagem do número total de vagens de cada planta; Massa de vagens por planta (MVP) - obtida pela pesagem de todas as vagens de cada planta; Número de grãos por vagem (NGV) - – obtido pela separação das vagens de cada uma das plantas individualmente; Massa de grãos por planta (MGP) – obtido pela debulha de todas as vagens das plantas individualmente e estimada a massa; peso de 1000 grãos e Produtividade de grãos secos (PGS).

Para tanto, os grãos foram peneirados e limpos, foi efetuada a pesagem e retirada de amostras para fins de determinação de umidade dos grãos. Com a massa total dos grãos da parcela (MTG), foi feita correção a 13% de umidade, para calcular a produtividade de grãos da parcela (PGP = MTG/área da parcela) e posteriormente transformada para produtividade de grãos secos (kg ha^{-1}) a 13% de umidade.

A plataforma de simulação do crescimento e rendimento das culturas utilizada foi o DSSAT v4.7.5 (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), que se constitui em um conjunto de programas para simular o desenvolvimento, crescimento e a produtividade em função da dinâmica solo-planta-atmosfera (JONES et al, 2010). As informações das cultivares são definidas em três arquivos (espécies, ecótipo e cultivar). O processo de ajuste de parâmetros inerentes a esses arquivos tais como área foliar específica, interceptação da radiação solar e tempo térmico entre o surgimento da primeira flor e a maturidade fisiológica foi efetuado com base nos dados experimentais (HOOGENBOOM et al. 2019a; 2019b).

Gerou-se o perfil de solo com base nas análises físicas e químicas das amostras de solo da área experimental por meio do módulo SBuild do DSSAT (Tabela 4). Foram coletadas também, amostras indeformadas de solo, nas mesmas profundidades em que estavam instalados os sensores de umidade, para a confecção da curva de retenção de água (Figura 7), realizadas no Laboratório de Física do Solo da Embrapa Meio-Norte, em Teresina, Piauí. Ajustou-se os valores do limite inferior de retenção de água no solo (SLLL) da capacidade de campo (SDUL). O fator de crescimento radicular do solo (SRGF) para cada camada foi determinado com base nas propriedades químicas do solo e por meio das análises da variação do conteúdo de água no solo ao longo do ciclo.

Tabela 4 - Parâmetros de entrada utilizados na calibração do solo Latossolo Amarelo Distrófico argissólico da região, incorporados à base de dados do DSSAT v 4.7.

SLB	SLLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI
5	0,07	0,21	0,31	0,5	7,00	1,55	2,91	19,1	5,4
20	0,07	0,21	0,31	1,0	7,00	1,58	1,53	23,0	1,9
40	0,08	0,17	0,33	1,0	7,00	1,52	0,9	21,7	2,2
60	0,06	0,18	0,33	0,8	7,50	1,46	0,76	24,5	3,8
80	0,06	0,18	0,33	0,8	7,50	1,54	0,76	24,5	3,8
100	0,06	0,21	0,33	0,8	7,50	1,54	0,76	24,5	3,8
120	0,06	0,21	0,33	0,32	7,50	1,54	0,76	24,5	3,8
180	0,06	0,21	0,33	0,0	7,50	1,54	0,76	24,5	3,8

SLB= profundidade das camadas (cm), SLLL = limite inferior ou ponto de murcha (cm^3), SDUL= limite superior (cm^3), SSAT= saturação (cm^3), SRGF= fator de crescimento da raiz, SSKS= condutividade hidráulica ($cm\ h^{-1}$), SBDM= densidade ($g\ cm^{-3}$), SLOC= carbono orgânico (%), SLCL= argila (%) e SLSI= silte (%).

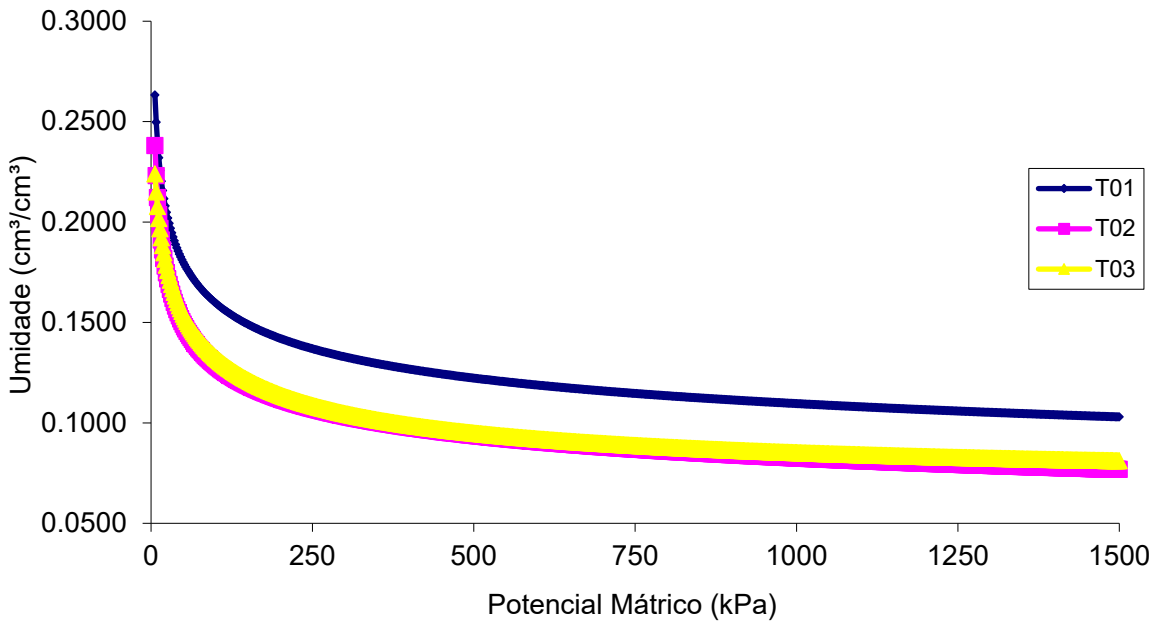


Figura 7 - Curva de retenção de água no solo da área experimental, Serra do Quilombo - Bom Jesus, PI. Fonte: Laboratório de Água e Solos da Embrapa Meio-Norte.

Avaliou-se o desempenho do modelo *CSM-CROPGRO-Soybean* para simular o balanço hídrico para diferentes profundidades do perfil do solo. Utilizou-se o módulo *Watbal.Out*, que apresenta um resumo do estado da água do solo no início e final de uma simulação (HOOGENBOOM et al., 1999). As rotinas de simulação do balanço hídrico do solo foram caraterizadas conforme proposto por Ritchie (1998).

A calibração das cultivares foi realizada por tentativa e erro, partindo-se das cultivares padrão do CROPGRO, considerando o mesmo grupo de maturação relativa e hábito de crescimento. Foram avaliados os estágios de desenvolvimento da cultura e os valores previstos e medidos da matéria seca aérea total, das folhas, dos caules, das vagens (grão + legume) e dos grãos.

3.2 Avaliação do modelo CSM-CROPGRO-Soybean na estimativa do rendimento de grãos de soja no cerrado do sudoeste piauiense

Utilizou-se o modelo *DSSAT CSM-CROPGRO-Soybean* previamente calibrado para as condições de solo e clima da região do cerrado piauiense, em função dos dados do experimento de campo realizado na safra 2019/2020. A avaliação do modelo foi realizada com parâmetros coletados em ensaios de valor de cultivo e uso (VCU) da soja conduzido pela Embrapa Meio Norte, na Fazenda Celeiro (latitude - 9º23'52" S, longitude - 45º07'40" O e altitude 640 m), localizada na Serra do Quilombo, a 90 km da área experimental (Fazenda Vô Desidério).

Os ensaios de VCU foram conduzidos em regime de sequeiro, com semeadura realizada em diferentes datas (Tabela 5). Os registros diários de precipitação pluvial (mm) foram obtidos de Xavier et al. (2022). Os dados climáticos diários foram obtidos do banco de dados da NASA, por meio do modulo *Nasa Power* (NASA, 2021). Os registros meteorológicos utilizados foram dados diários de umidade relativa do ar (%), temperatura do ar (ºC), velocidade do vento (ms^{-1}) e radiação solar ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$). As cultivares utilizadas nos ensaios de VCU para a avaliação do modelo são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 5 - Safra, datas de semeadura e colheita, dos experimentos de campo das safras 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020 na Fazenda Celeiro, município de Monte Alegre do Piauí.

Safra	Data de semeadura	Data de colheita
2016-2017	10/12/2016	02/04/2017
2017-2018	19/11/2017	14/03/2018
2018-2019	26/11/2018	16/03/2019
2019-2020	09/12/2019	03/04/2020

Tabela 6 - Cultivares avaliadas em ensaios de VC U anos agrícolas de 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020 na Fazenda Celeiro, município de Monte Alegre do Piauí.

Material	Tipo Crescimento	GM
	2016-2017	
5G 8015 IPRO	Determinado	8,0
AS 3797 IPRO	Determinado	7,9
AS3820 IPRO	Determinado	8,2
AS3850 IPRO	Determinado	8,5
BMX9086 OPUS	Determinado	8,6
BRSGM8.7 IPRO	Determinado	8,7
CDGM8.2 IPRO	Determinado	8,2
M8808 IPRO	Determinado	8,8
M8349 IPRO	Determinado	8,3
M8372 IPRO	Determinado	8,3
M8644 IPRO	Determinado	8,6
NS 8338 IPRO	Determinado	8,3
TMG 2179 IPRO	Determinado	7,9
TMG 2182 IPRO	Determinado	8,2
TMG 2185 IPRO	Determinado	8,5
TMG 2187 IPRO	Determinado	8,7
ADV (15/1002)	Indeterminado	7,2
ADV 4681 (15/1009)	Indeterminado	8,1
AS3810 IPRO	Indeterminado	7,1
BMX 75I77 IPRO (ULTRA)	Indeterminado	7,5
BMX8579 (BONUS)	Indeterminado	7,9
BMX GRATA	Indeterminado	8,0
	2017-2018	
AS3820 IPRO	Determinado	8,3
AS3850 IRPO	Determinado	8,1
FTR2182 IPRO	Determinado	9,1
FTR4183 IPRO	Determinado	8,3
FTS ATHENA RR	Determinado	8,2
M8349 IPRO	Determinado	8,9
M8349 IPRO	Determinado	8,3
M8372 IPRO	Determinado	8,5
M8372 IPRO	Determinado	8,2
M8644 IPRO	Determinado	8,4
NS8338 IPRO	Determinado	8,2
TMG1288 RR	Determinado	8,3
TMG2182 IPRO	Determinado	8,5
BÔNUS IPRO (8579 RSF IPRO)	Indeterminado	8,5
BÔNUS IPRO (8579 RSF IPRO)	Indeterminado	8,0
CERTA IPRO (80i84 RSF IPRO)	Indeterminado	8,6

DESAFIO RR (8473 RSF)	Indeterminado	7,4
DM81I84 RSF IPRO	Indeterminado	7,9
EXTRA IPRO (74i78 RSF IPRO)	Indeterminado	8,3
FTR1186 IPRO	Indeterminado	7,1
FTR4182 IPRO	Indeterminado	8,1
FTR4280 IPRO	Indeterminado	7,9
NSXI831615 IPRO	Indeterminado	7,4
ST797 IPRO	Indeterminado	8,2
SYN1285 RR	Indeterminado	7,2
	2018-2019	
AS3810 IPRO	Determinado	8,1
FTR2182 IPRO	Determinado	8,2
HO81I85 RSF IPRO (JAVAES)	Determinado	9,0
TMG2182 IPRO	Determinado	8,1
TMG2182 IPRO	Determinado	8,8
BMX74I78 IPRO (EXTRA).	Indeterminado	8,0
BMX75I77 RSF IPRO (ULTRA)	Indeterminado	7,2
BMX81I81 IPRO (EXTREMA)	Indeterminado	8,0
BMX8473 RR (DESAFIO)	Indeterminado	8,0
BMX8579 IPRO (BÔNUS)	Indeterminado	8,1
CERTA	Indeterminado	7,8
DM80I79 RSF	Indeterminado	8,1
DM8184 IPRO	Indeterminado	7,7
FTR3178 IPRO	Indeterminado	7,5
FTR3179 IPRO	Indeterminado	7,3
FTR4181 IPRO	Indeterminado	7,7
FTR4280 IPRO	Indeterminado	8,1
HO77HO110 IPRO (MARACAI)	Indeterminado	8,3
HO81HO110 IPRO (CRIXÁ)	Indeterminado	8,0
HO83HO113 IPRO (CRISTALINO)	Indeterminado	8,1
NS7780 IPRO	Indeterminado	8,6
NS7780 IPRO	Indeterminado	7,5
NS7780 IPRO	Indeterminado	8,0
RK7518 IPRO	Indeterminado	7,9
RK8115 IPRO	Indeterminado	7,9
RK8317 IPRO	Indeterminado	8,1
TMG1180 RR	Indeterminado	7,7
TMG 2286 IPRO	Indeterminado	8,3
	2019-2020	
BRS8182 RR	Determinado	8,3
BRS8383 IPRO	Determinado	8,1
BRS8980 IPRO	Determinado	8,3
BRS9280 RR	Determinado	8,6
M8349 IPRO	Determinado	8,8

M8372 IPRO	Determinado	7,7
M8644 IPRO	Determinado	8,3
M8349 IPRO	Determinado	8,3
BMX81i81 IPRO (EXTREMA)	Indeterminado	8,5
BMX81i81 IPRO (EXTREMA)	Indeterminado	8,1
BMX81i81 IPRO (EXTREMA)	Indeterminado	7,8
BMX84i86 IPRO (DOMÍNIO)	Indeterminado	7,8
BMX84i86 IPRO (DOMÍNIO)	Indeterminado	8,6
BMX 8579 IPRO (BÔNUS)	Indeterminado	7,9
BMX 8579 IPRO (BÔNUS)	Indeterminado	8,1
BMX 8579 IPRO (BÔNUS)	Indeterminado	8,6
BRS7981IPRO	Indeterminado	8,5
BRS8281IPRO	Indeterminado	8,1
BRS7482RR	Indeterminado	8,5
DM80i79 IPRO	Indeterminado	8,2
DM82i78 IPRO	Indeterminado	7,9
DM82i78 IPRO	Indeterminado	7,4

Visando a avaliação da robustez do modelo DSSAT CSM-CROPGRO-Soybean, em função dos dados de produtividade obtidos de uma fazenda comercial de soja da região, referente aos anos agrícolas de 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020, os dados obtidos e mensurados de solo, clima, crescimento de plantas e os valores de produtividade de grãos da cultura, foram utilizados para criação de um experimento no DSSAT por meio do módulo XBuild, incorporando os mesmos parâmetros de solo e coeficientes de cultivar que haviam sido previamente ajustados ao modelo durante o processo de calibração.

Para análise do desempenho do modelo nas etapas de calibração e avaliação, considerou-se o índice de concordância de Willmott, d-Stat (WILLMOTT, 1982), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e a correlação de Pearson (r). Os dados para o procedimento estatístico da análise de correlação entre o rendimento simulado e rendimento observado, foram apresentados na forma de gráfico elaborado pelo programa estatístico R, versão 4.2.1 (R, 2022).

3.3 Utilização do modelo CSM-CROPGRO-Soybean para estimar épocas de semeadura da soja no cerrado piauiense

Utilizou-se o modelo CSM-CROPGRO-Soybean, do pacote DSSAT v4.7.5 (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), que se constitui em um conjunto de programas

para simular o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade em função da dinâmica solo-planta-atmosfera (JONES et al., 2010), previamente calibrado e avaliado, para simular o rendimento de grãos de soja semeada em diferentes datas, em regime de sequeiro, em oito municípios da região Sudoeste do Estado do Piauí (Figura 8).

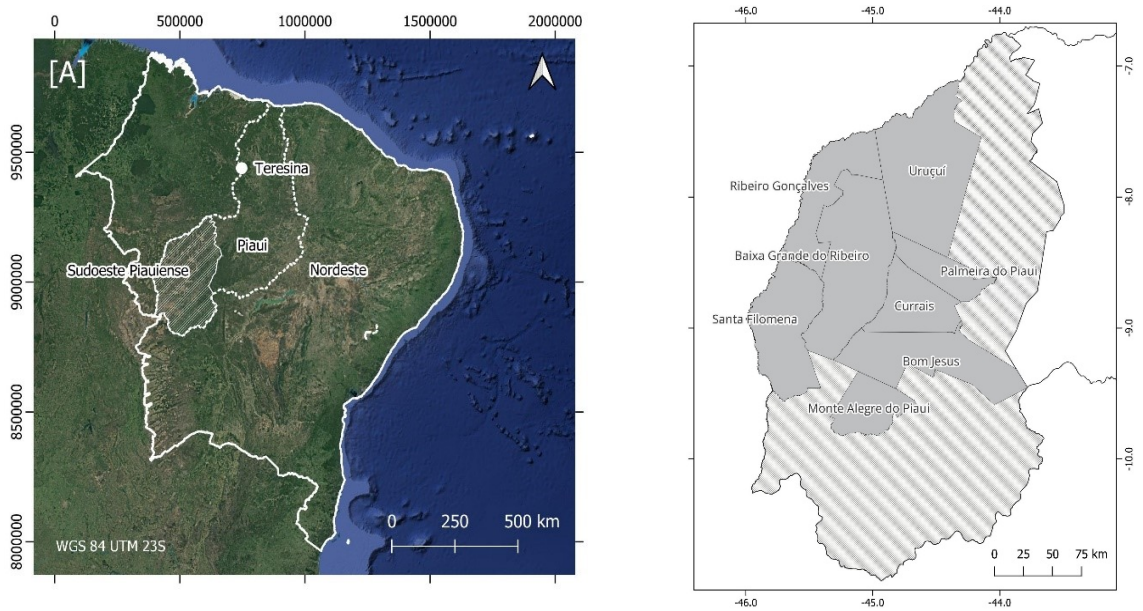


Figura 8 - Localização da área de cultivo de soja destacando a mesorregião Sudoeste Piauiense.

As coordenadas geográficas dos municípios são apresentadas na Tabela 7. Empregou-se o dispositivo de análise sazonal do modelo, em conjunto com dados históricos diários de clima referentes aos municípios piauienses de Baixa Grande do Ribeiro, Bom Jesus, Currais, Monte Alegre do Piauí, Palmeira do Piauí, Ribeiro Gonçalves, Santa Filomena e Uruçuí para replicar cenários de épocas de semeadura referente as safras 1989/1990 a 2019/2020, permitindo a simulação de 30 safras. Os dados meteorológicos empregados neste estudo foram obtidos do banco de dados diários de Xavier et al. (2022), compreendendo precipitação pluviométrica (mm), temperatura do ar (ºC) e umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (ms^{-1}) e radiação solar ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$).

O cerrado piauiense possui uma grande variabilidade de solo, o que afeta tanto os atributos químicos quanto físicos do solo. Diferentes atributos físicos levam a diferentes capacidades de acúmulo de água no solo. Assim, para viabilizar a comparação entre os municípios, adotou-se três tipos básicos de solos (0,40, 0,66 e 1,21 $mm\ cm^{-1}$ de água disponível - AD) em todas as localidades, para representar a grande diversidade dos solos do cerrado piauiense. Para fins de análises de risco no Zoneamento Agrícola de Risco Climático, esses solos são classificados como AD1, AD3 e AD5, respectivamente, conforme Instrução Normativa SPA/MAPA Nº 1, de 21 de junho de 2022 (MAPA, 2022), baseada em critérios de

classificação estabelecidos por Teixeira et al. (2021). Os perfis de solo requeridos pelo modelo de simulação de cultivo foram construídos com base nos dados do perfil do solo utilizado na calibração do modelo.

Tabela 7 - Municípios do Sudoeste Piauiense avaliados nas simulações, com respectivas coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude).

Municípios	Coordenadas Geográficas		
	Latitude	Longitude	Altitude
Baixa Grande do Ribeiro	8°37’30,0” S	45°07’30,0” W	459 m
Bom Jesus	9°07’30,0” S	44°37’30,0” W	476 m
Currais	8°52’30,0” S	44°37’30,0” W	528 m
Monte Alegre do Piauí	9°37’30,0” S	45°07’30,0” W	472 m
Palmeira do Piauí	8°37’30,0” S	44°22’30,0” W	520 m
Ribeiro Gonçalves	7°52’30,0” S	45°22’30,0” W	400 m
Santa Filomena	8°52’30,0” S	45°37’30,0” W	458 m
Uruçuí	7°52’30,0” S	44°37’30,0” W	417 m

Avaliou-se duas cultivares de soja, BRS 8980 IPRO (BRS 8980), que apresenta crescimento determinado e a cultivar BMX 84I86 (Domínio), de crescimento indeterminado, que tiveram seus coeficientes genéticos foram anteriormente calibrados e validados para a região do cerrado piauiense, cadastradas no modelo seguindo todas as orientações técnicas relacionadas ao manejo da cultura, controle fitossanitário e adubação recomendados para a soja na região. Desse modo, a diferenciação na produtividade simulada da soja para as diferentes épocas de semeadura foram por causa das condições climáticas.

O modelo de cultura CROPGRO-Soybean foi usado para simular as produtividades atingíveis e o ciclo das cultivares. O rendimento atingível foi usado porque a maior parte da soja é cultivada sob condições de sequeiro, e o rendimento está ligado ao déficit hídrico nas regiões de produção, conforme enfatizado por Battisti e Sentelhas (2019).

O manejo foi programado no módulo XBuild do modelo DSSAT (Figura 9), com opção de fazer simulações de produtividade de grãos de soja, para semeaduras automáticas, selecionando a melhor data de semeadura dentro de cada decêndio dos meses de novembro, dezembro e janeiro para cada ano avaliado, seguindo a janela de semeadura da soja recomendada para a região pelo Zoneamento de Risco Agroclimático do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2021).

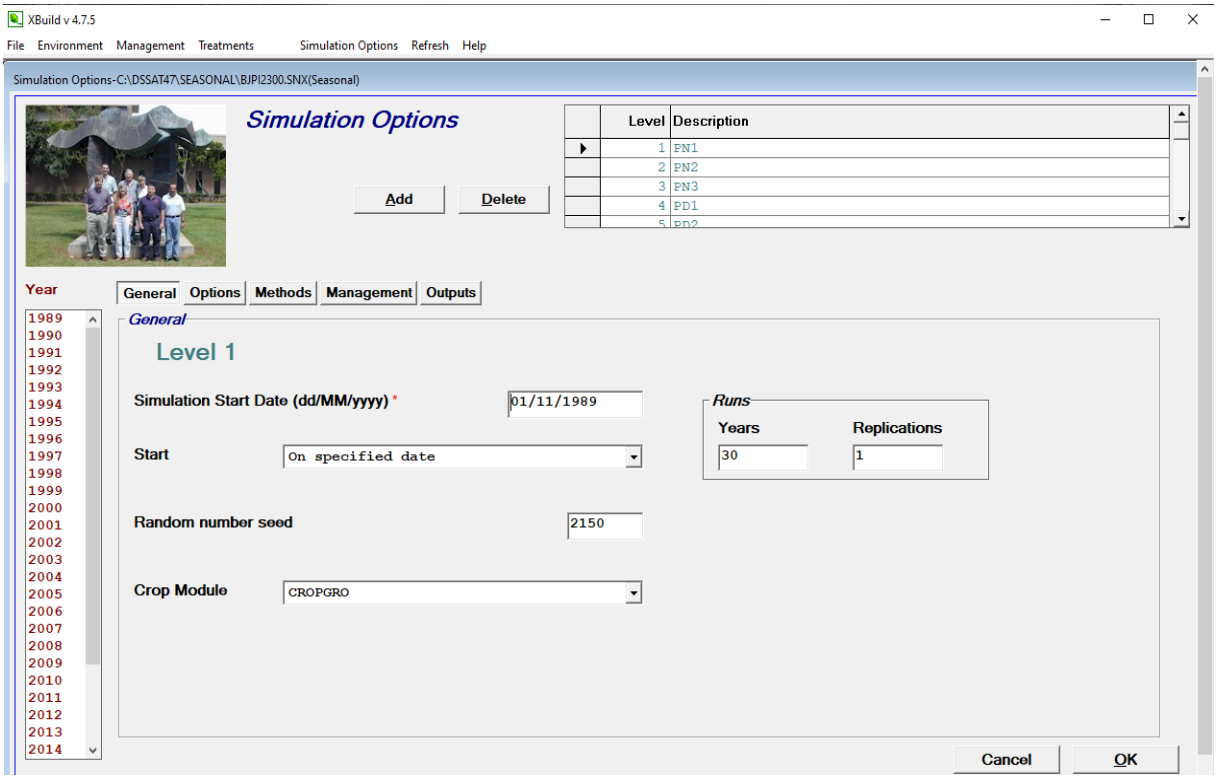


Figura 9 - Visão geral das opções de simulação do módulo XBuild do modelo DSSAT.

Na determinação da nomenclatura dos tratamentos, foram considerados três tipos de solos: solo tipo 1 (0,40 mm cm^{-1} de AD), solo tipo 2 (0,66 mm cm^{-1} de AD) e solo tipo 3 (1,21 mm cm^{-1} de AD). Para cada decêndio, as datas de semeadura foram definidas como: 1Nov, 2Nov e 3Nov para o 1°, 2° e 3º decêndios do mês de novembro; 1Dez, 2Dez e 3Dez para o 1°, 2° e 3º decêndios do mês de dezembro; 1Jan, 2Jan e 3Jan para o 1°, 2° e 3º decêndios do mês de janeiro, respectivamente.

Para cada data de semeadura, os valores da produtividade simulada de grãos foram organizados na forma de disposição de frequência. O tempo médio do ciclo das cultivares avaliadas foram empregados também para estabelecer o comportamento do ciclo das cultivares em conformidade às datas de semeadura, permitindo estabelecer os níveis de risco que o tomador de decisão se encontra disposto a assumir. Posteriormente, as produtividades de soja obtidas pelo modelo foram comparadas a dados de produtividade média obtidos de uma fazenda comercial de soja da região, localizada na Serra do Quilombo no município de Bom Jesus, Piauí, na Fazenda São Carlos (latitude – 9°17'02,0" S, longitude – 44°44'42,7" W e altitude 633 m), que cultiva soja no cerrado piauiense a mais de 20 anos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Calibração do modelo CSM-CROPGRO-Soybean para a estimativa de biomassa seca e rendimento de grãos de soja no cerrado do sudoeste piauiense

Na Tabela 8 são apresentados os coeficientes genéticos, com os parâmetros pertencentes ao arquivo de cultivares (SBGRO.CUL) ajustados, utilizados no processo de calibração para as cultivares BRS 8980, Domínio, Extrema e Bônus. O processo de calibração consistiu em primeiro ajustar os parâmetros das cultivares associados com a fenologia da cultura, em comparação com os dados observadas dos principais estágios fenológicos (R1, R3, R5 e R7) e em seguida foi realizada a calibração dos coeficientes associados com a alocação dos fotoassimilados e com o crescimento da cultura. Os dados climáticos foram inseridos na plataforma por meio do pacote computacional Weatherman (JONES et al., 2003; HOOGENBOOM et al., 2019b; 2021). Os dados de fenologia e de biomassa foram utilizados na análise das simulações por meio do módulo *GBuild*.

Os dados médios diários de temperatura máxima, mínima e precipitação ao longo do ciclo de crescimento são mostrados na Figura 10. Durante o ciclo da soja, registrou-se um total de precipitação pluvial de 1.053,6 mm para a cultivar BRS 8980 e 1.122,8 mm para as cultivares Domínio, Extrema e Bônus. É importante destacar que essa quantidade de precipitação não foi uniformemente distribuída ao longo do ciclo das plantas de soja, resultando em períodos de seca que causaram déficit hídrico em determinadas fases de desenvolvimento, o que explica em parte a redução na produtividade das cultivares.

A retenção de água acumulada no solo durante os períodos de cultivo, considerada como os volumes evapotranspirados mais o valor final armazenado no solo, foram estimadas em 618,5 mm, 569,6 mm, 533,2 mm e 537,7 mm para as cultivares BRS 8980, Domínio, Extrema e Bônus, respectivamente. A evapotranspiração de cultivo, calculada pelo modelo, foi de 485,1 mm, 464,6 mm, 451,00 mm e 452,8 mm para as mesmas cultivares, respectivamente.

Tabela 8 - Valores finais dos coeficientes de cultivar calibrados com dados do experimento em Bom Jesus-PI, para BRS 8980 (MG 8.9), Domínio (MG 8.4), Extrema (MG 8.1) e Bônus (MG 7.9).

Característica	Definição	Unidade	BRS	DOM	EXT	BON
CSDL	Comprimento crítico do dia abaixo do qual o desenvolvimento reprodutivo progride sem efeito do fotoperíodo	horas	12,07	12,07	12,07	12,07
PPSEN	Declive da resposta relativa do desenvolvimento ao fotoperíodo	horas	0,330	0,330	0,330	0,330
EM-FL	Tempo entre a emergência das plantas e o surgimento das flores (R1)	dias fototérmicos	39,0	33,0	32,0	30,0
FL-SH	Tempo entre a primeira flor e a primeira vagem (R3)	dias fototérmicos	10,0	10,0	10,0	10,0
FL-SD	Tempo entre a primeira flor e a primeira semente (R5)	dias fototérmicos	29,0	13,0	15,5	13,5
SD-PM	Tempo entre a primeira semente (R5) e a maturidade fisiológica (R7)	dias fototérmicos	26,2	36,0	29,5	27,5
FL-LF	Tempo entre a primeira flor (R1) e o final da expansão foliar	dias fototérmicos	39,0	36,0	30,0	30,0
LFMAX	Taxa máxima de fotossíntese foliar a 30 °C, 350 vpm CO_2 e alta luminosidade	mg $CO_2/m^2/s$	1,030	1,030	1,030	1,030
SLAVR	Área foliar específica da cultivar sob condições de crescimento padrão	cm^2/g	300	385	220	230
SIZLF	Tamanho máximo da folha estendida (trifólio)	cm^2	170	180	180	180
XFRT	Fração máxima de crescimento diário que é particionado para semente+vagem	g/g	1,0	1,0	1,0	1,0
WTPSD	Peso máximo por semente	g	0,15	0,16	0,16	0,16
SFDUR	Duração do enchimento de sementes nas condições normais de crescimento	dias fototérmicos	25,0	19,0	19,0	19,0
SDPDV	Média de sementes por vagem em condições normais de crescimento	#/vagem	2,20	2,20	2,20	2,20
PODUR	Tempo necessário para a cultivar atingir o crescimento potencial das vagens	dias fototérmicos	10	10	10	10
THRSH	Porcentagem de debulha	semente/(semente + casca)	78	78	78	78
SDPRO	Fração de proteína nas sementes	g(proteína)/g (semente)	0,4	0,4	0,4	0,4
SDLIP	Fração de óleo nas sementes	g(óleo)/g (semente)	0,2	0,2	0,2	0,2

BRS= BRS 8980, DOM= BM8486 BRASMAX Domínio, EXT= BM8181 BRASMAX Extrema e BON= BM8579 BRASMAX Bônus.

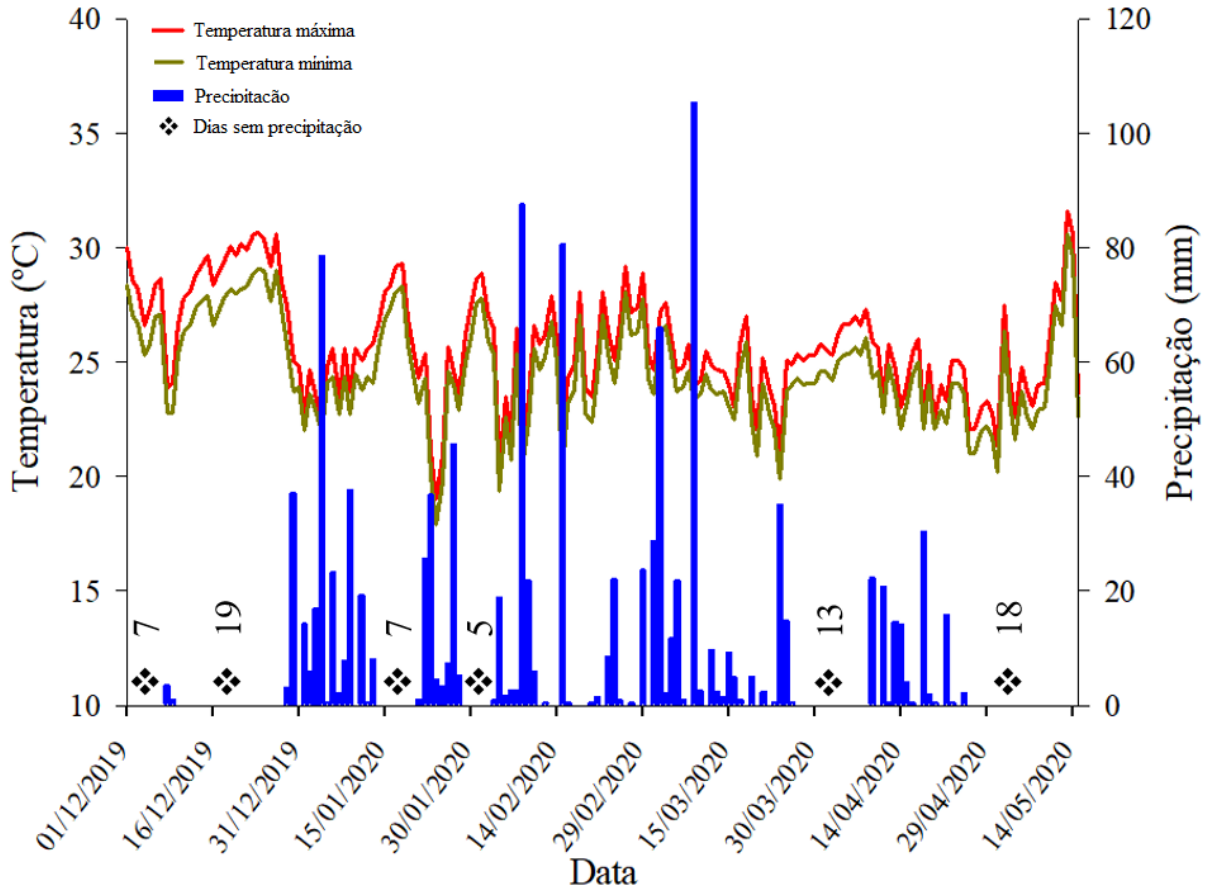


Figura 10 - Temperatura máxima, mínima e precipitação ao longo do ciclo.

A evapotranspiração ocorrida durante o ciclo das cultivares revelou que a eficiência de uso de água (EUA) foi superior à 0,3 kg m^{-3} para todas as épocas de semeadura. Os valores de EUA obtidos com a precipitação pluvial para cada data de semeadura foram de 0,725, 0,529, 0,473 e 0,393 kg m^{-3}, para as cultivares BRS 8980, Domínio, Extrema e Bônus, respectivamente (Figura 11). Isso significa que são necessários 1000 litros de água para produzir 0,725, 0,529, 0,473 e 0,393 kg de soja com as lâminas pluviométricas ocorridas nas primeira, segunda e terceira datas de semeadura, para as cultivares BRS 8980, Domínio, Extrema e Bônus, respectivamente.

Ao analisarem os efeitos da falta de umidade do solo no rendimento da soja, Wijewardana et al. (2018) constataram que a deficiência hídrica pode levar ao aumento no número de sementes pequenas e murchas, afetando negativamente a produtividade. Observa-se, portanto no presente estudo, que a precipitação pluvial referente à primeira época de semeadura (cultivar BRS 8980) foi capaz de manter o equilíbrio de água no solo dentro da faixa adequada para o cultivo da soja, considerando as circunstâncias edafoclimáticas do cerrado sudoeste piauiense. Por isso, a combinação dessa época de semeadura com a precipitação pluvial ocorrida no período resultou em maior produtividade de grãos para essa cultivar.

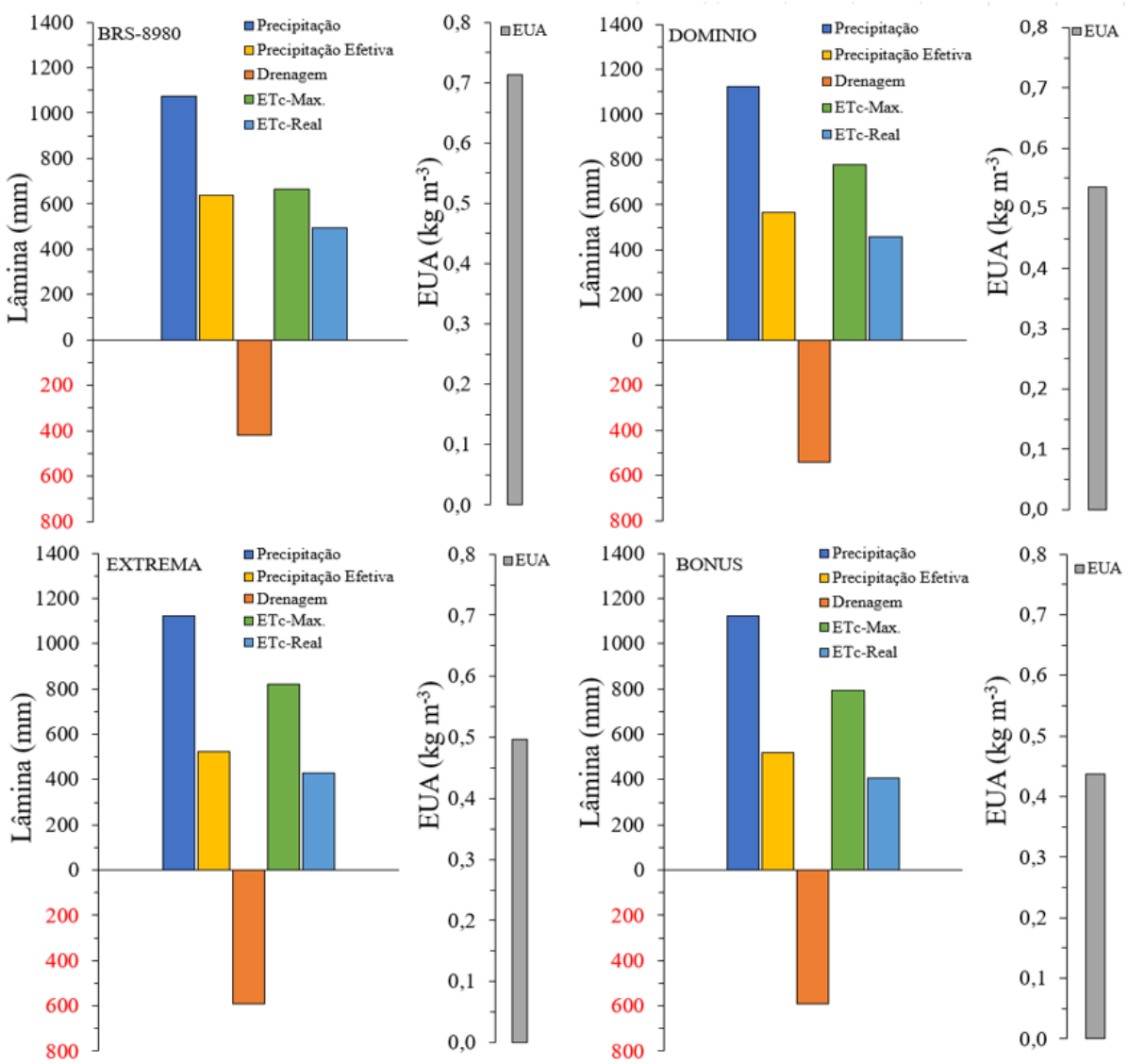


Figura 11 - Balanço hídrico do solo, em função da precipitação pluvial durante o ciclo das cultivares.

Destaca-se, ainda, que essas cultivares tiveram a colheita antecipada devido a problemas de infestação por pragas, como a mosca branca. Essas infestações tendem a ocorrer com maior incidência em semeaduras realizadas mais tardias, o que limita o potencial máximo de produção da cultura. Nesse sentido, Vasconcellos et al. (2023) relatam que normalmente, cultivos tardios sofrem com elevadas infestações de mosca branca, uma vez que, nas semeaduras realizadas no início da janela de plantio, a frequência de migração de insetos provenientes dessas áreas é muito elevada.

Ao analisar o comportamento das diferentes cultivares, pode-se observar que todas elas demonstraram uma boa acurácia para a simulação do peso de folhas (LWAD) ao longo do ciclo de crescimento. Para essa variável, um padrão comum a todas as cultivares é a presença de um

crescimento inicial lento da matéria seca nas fases iniciais da vegetação, seguido por um subsequente aumento exponencial à medida que a cultura se desenvolve (Figura 12).

Os valores de d-Stat (Tabela 9) se mostram altos, variando entre 0,79 e 0,96, evidenciando uma boa aderência entre os resultados simulados e os observados para as quatro cultivares nas diferentes épocas de semeadura. Tal fato também foi observado por Battisti et al. (2017) que utilizaram esse modelo para estimar a fenologia e o crescimento da cultura da soja em Mato Grosso.

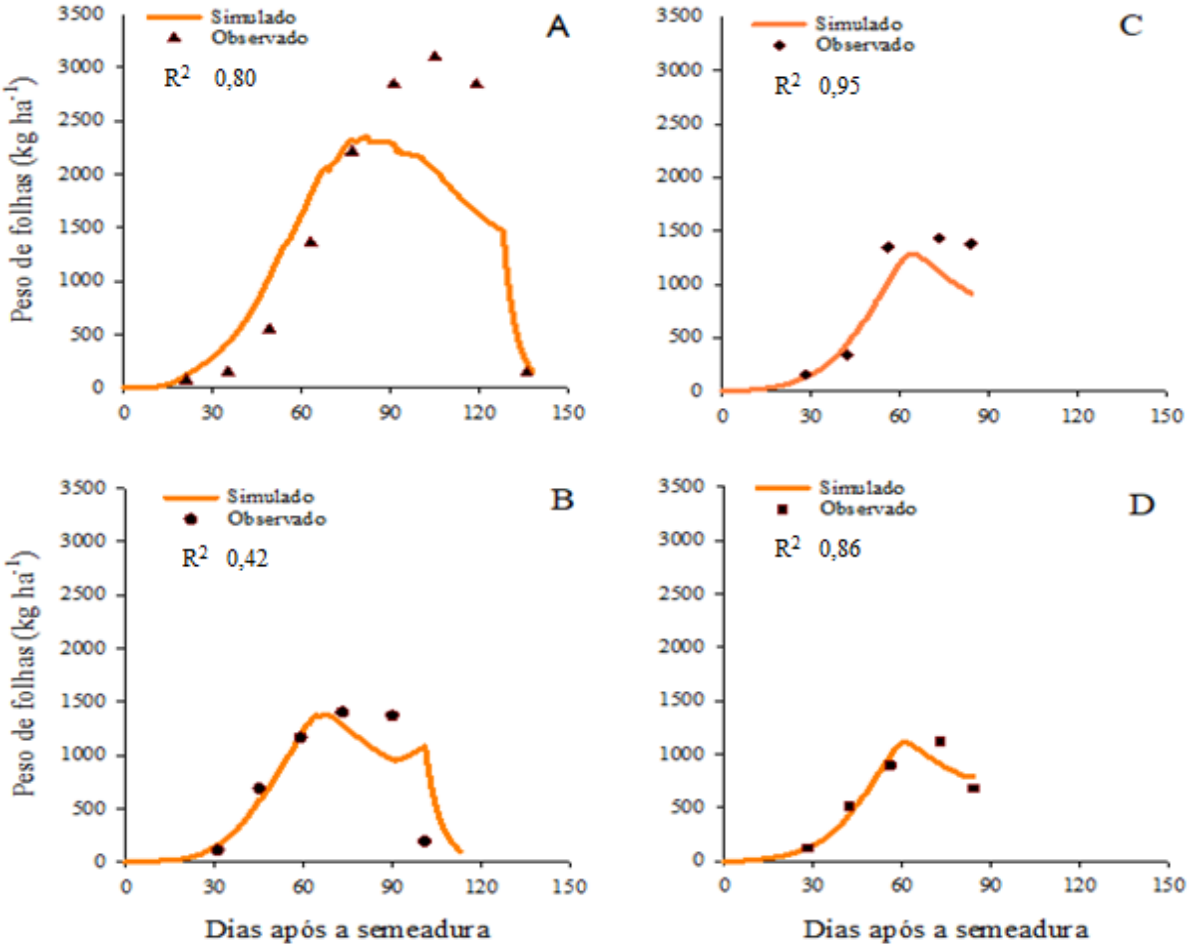


Figura 12 - Variável peso das folhas das cultivares ao longo do ciclo de desenvolvimento, representado por linha (valores simulados) e símbolos (valores observados) para: (A) cultivar BRS 8980, semeada na primeira época (29/11/2019), (B) cultivar Domínio, semeada na segunda época (14/01/2020), (C) cultivar Extrema, semeada na terceira época (30/01/2020) e (D) cultivar Bônus, semeada na terceira época (30/01/2020).

O acúmulo máximo de matéria seca das folhas observado para a cultivar BRS 8980 (Figura 12A) foi alcançado nos 100 dias depois da semeadura, acima do valor simulado pelo modelo. Além disso, notou-se que no início do ciclo dessa cultivar, o modelo apresentou valores ligeiramente mais elevados do que os observados no campo. Entretanto, a partir dos 90 dias

após a semeadura, esses valores começaram a diminuir gradualmente. Conforme o ciclo da cultura avançou, os valores simulados se aproximaram dos valores observados, tornando-se semelhantes no final do ciclo.

Observou-se ainda que as cultivares Domínio e Bônus (Figuras 12B e 12D) apresentaram comportamento inverso ao da cultivar Extrema (Figura 12C), com leve incremento no peso de folhas simulado em relação ao observado, no final do ciclo, devido ao baixo índice de ramificação como uma de suas características. Entretanto ressalta-se que os valores simulados estão coerentes com os observados em campo e que esses pequenos desvios estão dentro do esperado para os ajustes realizados com modelos biofísicos, conforme observado em outros trabalhos (BATTISTI et al. 2017, TEIXEIRA et al. 2019, CUADRA et al. 2021).

Para a biomassa seca aérea total todas as simulações apresentaram um bom desempenho. Importante evidenciar que apesar de diferentes pesos de biomassa seca total em função das cultivares e das datas de semeadura, as calibrações apresentaram boa acurácia dos valores simulados em relação aos valores observados no ensaio de campo, com valores de coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,92, 0,88, 0,81 e 0,95, para as cultivares BRS 8980, Domínio, Extrema e Bônus, respectivamente (Figuras 13A a 13D). Segundo Battisti, Sentelhas e Boote (2017), é importante considerar a calibração do modelo não apenas para o rendimento, mas também considerando observações da biomassa seca, já que erros nas calibrações podem levar a um processo de compensação, podendo ocorrer uma boa previsão de rendimento, mas com base em simulações fisicamente equivocadas.

O modelo utilizado refletiu de forma coerente o ganho de biomassa seca obtido nos cultivos, com os melhores resultados obtidos na simulação com a cultivar BRS 8980. Tendência oposta para simulação da estimativa da biomassa total foi identificada por Battisti, Sentelhas e Boote (2017) que observaram que o modelo DSSAT subestimou a biomassa aérea total da soja em condições de sequeiro, em simulação para a cultura da soja no Sul do Brasil. Portanto, apesar da consistência geral do modelo utilizado neste estudo, é importante considerar que existem diferenças e peculiaridades entre os modelos de simulação, bem como as condições específicas de cultivo, que podem levar a discrepâncias nos resultados obtidos.

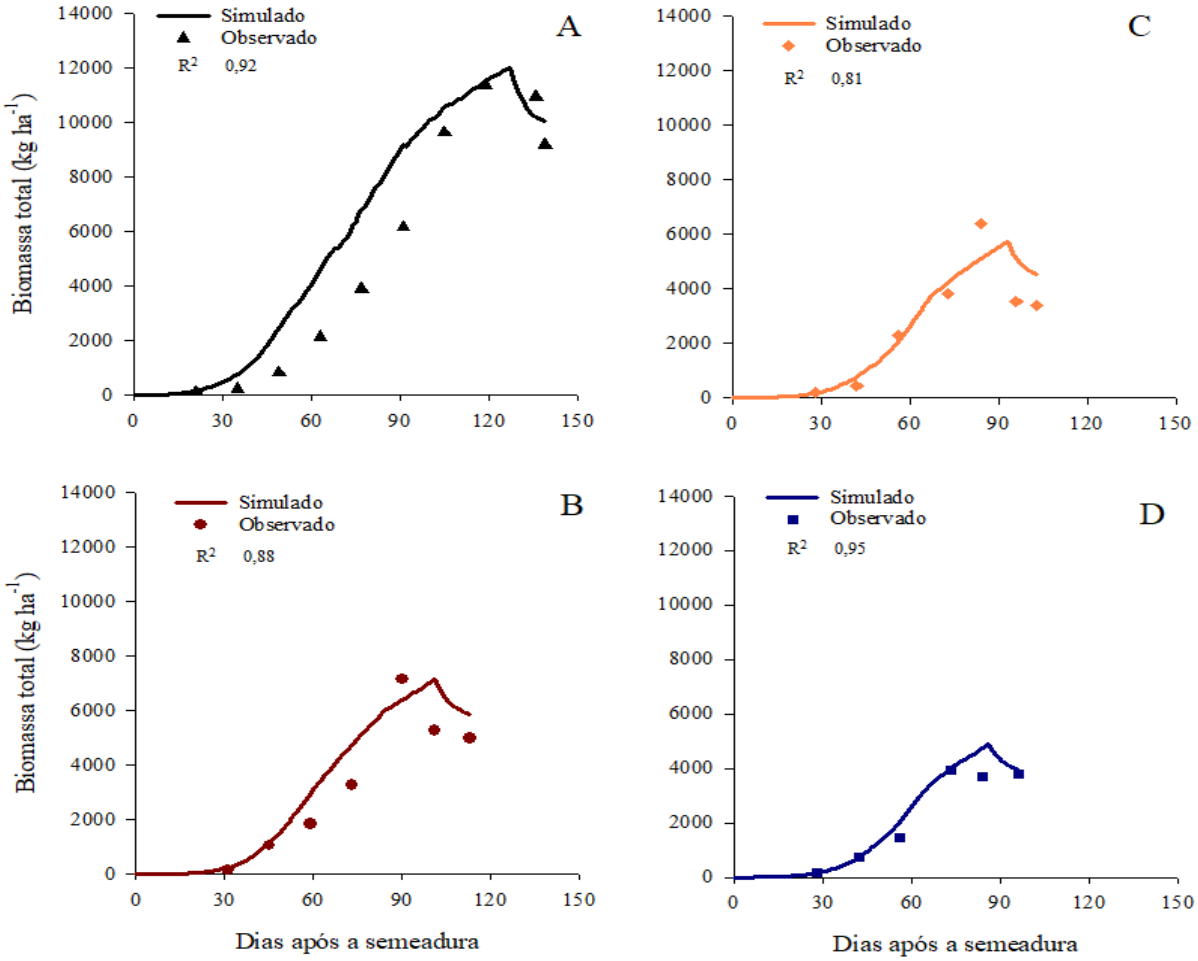


Figura 13 - Biomassa seca aérea total ao longo do ciclo observados (símbolos) e simulados (linhas) em função das datas de semeadura e cultivares: (A) semeadura realizada no dia 29/11/2019 (BRS 8980), (B) semeadura em 14/01/2020 (Domínio) e (C e D) semeadura em 30/01/2020 (Extrema e Bônus).

O comportamento do modelo em relação à variável peso de vagens seguiu uma tendência consistente nas quatro cultivares avaliadas. Em linhas gerais, observou-se uma boa concordância entre os dados de campo e as simulações do modelo durante as fases iniciais do desenvolvimento das vagens, que ocorreram aproximadamente aos 55, 55, 60 e 80 dias após a semeadura, para as cultivares Bônus, Extrema, Domínio e BRS 8980, respectivamente (Figura 14).

Contudo, à medida que o período de desenvolvimento das plantas avançou, notou-se um distanciamento entre os dados observados e as estimativas do modelo. Especificamente, o modelo subestimou os valores observados para as cultivares BRS 8980, Domínio e Bônus. Por outro lado, os valores observados para a cultivar Extrema no final do ciclo de crescimento foram idênticos às previsões do modelo.

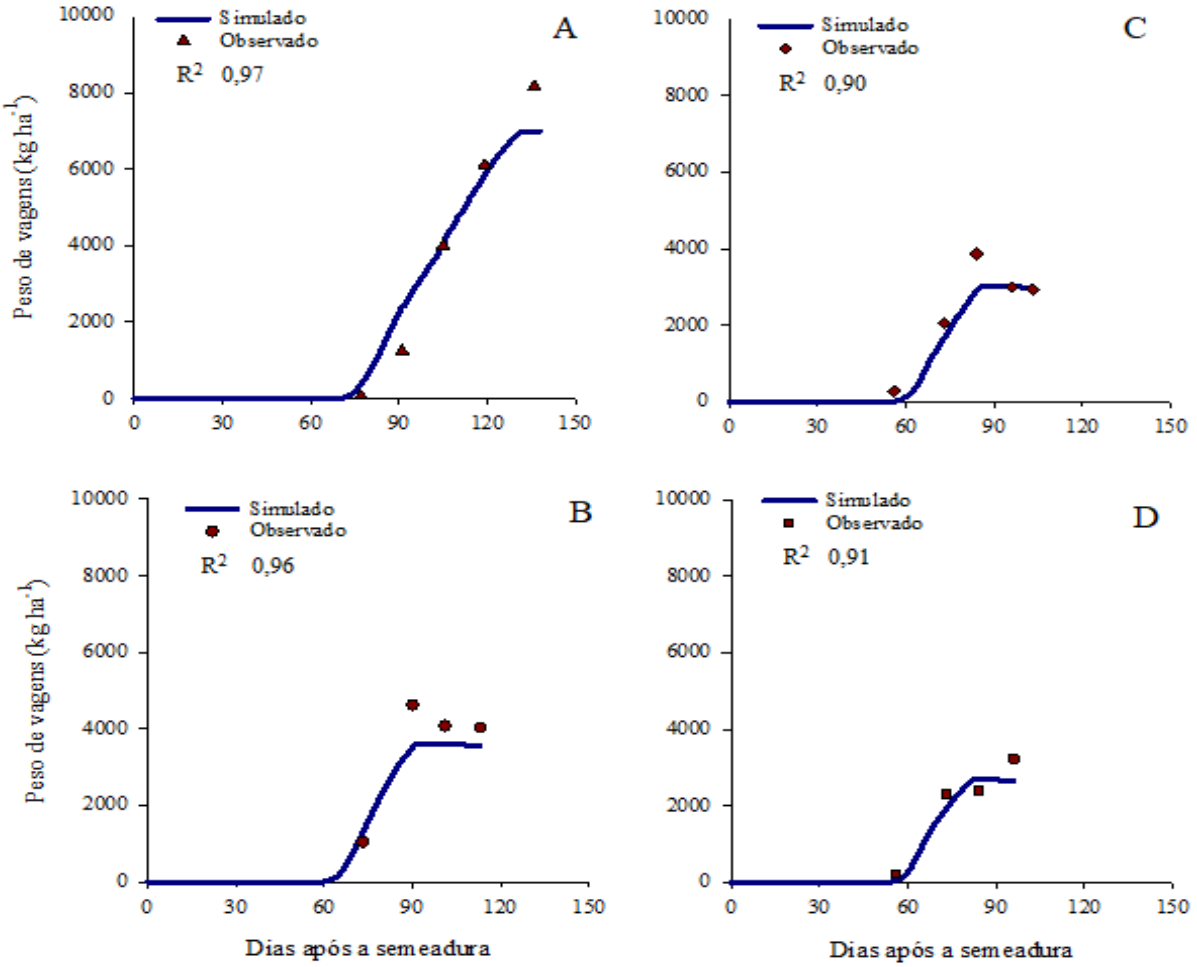


Figura 14 - Peso de vagens ao longo do ciclo observados (símbolos) e simulados (linhas) para as cultivares BRS 8980, Domínio, Extrema e Bônus.

Esses resultados podem ser explicados devido à época de semeadura e às características das cultivares. Embora as variedades de soja testadas sejam amplamente cultivadas na região em estudo, é frequente observar variações nas variáveis analisadas em função da época de semeadura, conforme Carmo et al. (2018) destacaram, a época de implantação da cultura da soja exerce atuação direta na composição das plantas, sendo capaz de alterá-la de acordo com o momento da semeadura.

Os resultados revelam um ajuste satisfatório do modelo DSSAT CSM-CROPGRO-Soybean, em relação à cultura da soja na região do cerrado do Sudoeste Piauiense. Esse ajuste foi alcançado após a calibração dos coeficientes genéticos, apresentando padrão de desenvolvimento e crescimento similar aos dados coletados e estatísticas similares às obtidas em outros estudos (Tabela 9). Esses resultados corroboram com Reis et al. (2020), que ao avaliarem a interferência da oscilação climática na produção de soja, concluíram que o modelo DSSAT CSM-CROPGRO-Soybean apresentou boa capacidade preditiva, confirmada pelos

parâmetros estatísticos, indicando alta aplicabilidade para as condições ambientais da região do MATOPIBA.

Tabela 9 - Parâmetros estatísticos avaliados para peso de folhas, peso de vagens e biomassa seca total da parte aérea no processo de calibração do modelo CSM-CROPGRO-Soybean ao final do ciclo das cultivares.

Parâmetro	BRS 8980	Domínio	Extrema	Bônus
Peso de folhas				
R^2	0,80	0,42	0,95	0,86
RMSE	614,96	405,88	290,51	126,47
d-Stat	0,90	0,79	0,90	0,96
Peso de vagens				
R^2	0,97	0,96	0,90	0,91
RMSE	761,51	660,57	482,85	379,08
d-Stat	0,98	0,92	0,95	0,97
Biomassa seca total				
R^2	0,92	0,88	0,81	0,95
RMSE	1694,00	1089,10	914,32	481,15
d-Stat	0,96	0,94	0,94	0,97

Quanto à acurácia do modelo em relação à estimativa da produtividade de grãos das cultivares de soja, o suprimento hídrico associado à genética das cultivares e ao manejo fitossanitário adotado, proporcionou produtividade observada de 3.516 kg ha^{-1}, para a cultivar semeada na 1ª época de semeadura (BRS 8980); 2.456,06 kg ha^{-1}, para a cultivar semeada na 2ª época de semeadura (Domínio); 2.133 kg ha^{-1}, para a cultivar semeada na 3ª época de semeadura (Extrema) e 1.781,08 kg ha^{-1}, para a cultivar semeada na 3ª época de semeadura (Bônus). A produtividade simulada foi de 4.117 kg ha^{-1}, 2.847 kg ha^{-1}, 2.378 kg ha^{-1} e 2.120 kg ha^{-1} para BRS 8980, Domínio, Extrema e Bônus, respectivamente.

Verificou-se que o modelo superestimou a produtividade de grãos para todas as datas de semeadura avaliadas, em 14,59%, 13,73%, 10,30% e 15,99% para BRS 8980 (1ª época), Domínio (2ª época), Extrema (3ª época) e Bônus (3ª época), respectivamente (Figura 15). Entretanto, o modelo capturou de forma consistente os efeitos dos períodos de deficiência hídrica, principalmente para as semeaduras mais tardias, consistente com a janela de plantio indicada para a região (31/01/2020) pelo ZARC (MAPA, 2021; BRASIL, 2022). Observou-se também, que a semeadura mais tardia da soja, em relação às recomendações de data de

semeadura indicadas para a região, acarretou redução da produtividade de grãos, a qual também foi seguida pelos dados simulados (Figura 15).

A maior produtividade de grãos simulada (4.117 kg ha^{-1}) e observada (3.516 kg ha^{-1}), foi obtida com a cultivar BRS 8980. Esse resultado provavelmente se deve à influência das diferenças genéticas entre as cultivares, aos distintos coeficientes genéticos ajustados ou mesmo ao fato de ter sido semeada no mês de novembro. Essa conclusão é apoiada pelos resultados obtidos por Reis et al. (2020), que constataram que as maiores produtividades de grãos nas regiões de Balsas, MA, e Uruçuí-PI foram obtidas quando a soja foi semeada em novembro.

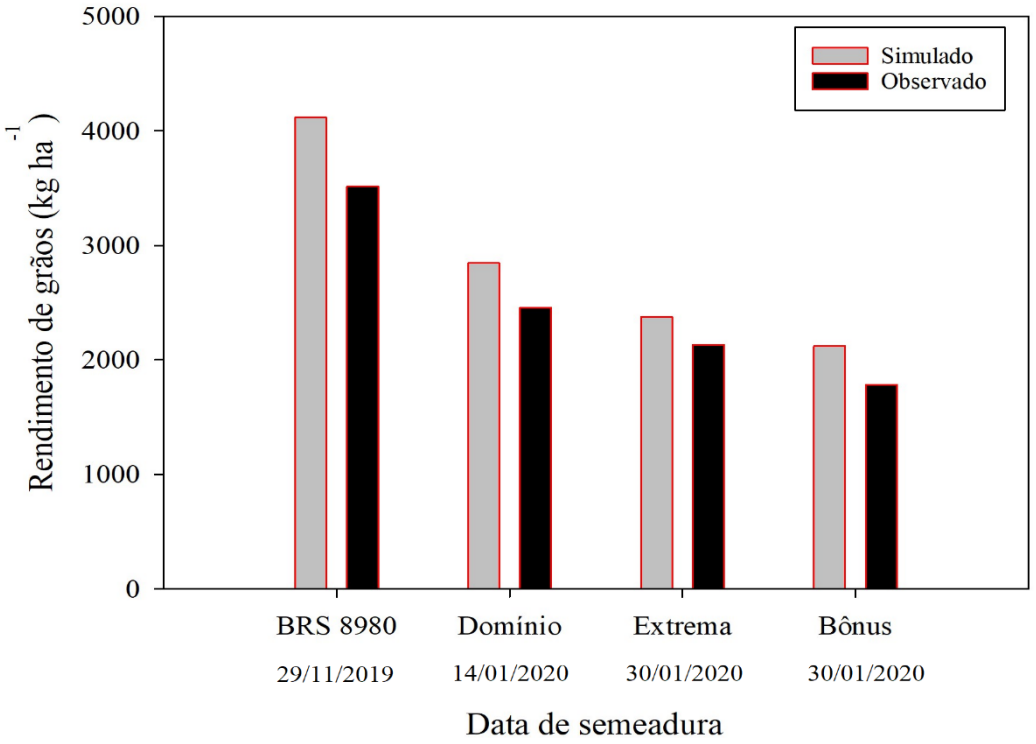


Figura 15 - Variável rendimento de grãos das cultivares BRS 8980, Domínio, Extrema e Bônus, representado por barras cinza (simulado) e preto (observado).

Ao analisar os resultados obtidos para essa variável, é evidente que o modelo se mostra muito capaz de fazer previsões de crescimento e produtividade de grãos de soja. É importante ressaltar que o processo de calibração se baseou exclusivamente nos dados do experimento conduzido em Bom Jesus, PI, que possui condições climáticas distintas da região de origem do modelo.

Apesar das diferenças nas condições climáticas, as simulações apresentaram comportamentos semelhantes. Contudo, é relevante observar que o atraso na semeadura das cultivares Bônus e Extrema em 31/01/2020 mostrou uma tendência de reduzir o potencial

produtivo. Isso se deve à exposição dessas cultivares a condições hídricas mais adversas, o que resultou na diminuição do peso das vagens nesses tratamentos.

4.2 Avaliação do modelo CSM-CROPGRO-Soybean na estimativa do rendimento de grãos de soja no cerrado do sudoeste piauiense

A avaliação do CSM-CROPGRO-Soybean na simulação do rendimento de grãos, de acordo com metodologia desenvolvida por Shimakura (2006), que estabelece sistema de classificação para o coeficiente de Pearson, mostrou uma forte correlação entre o rendimento de grãos medido e previsto para o ano agrícola 2018-2019, com um valor r de Pearson igual a 0.74. Nos anos agrícolas 2017-2018 e 2019-2020, foi observada uma correlação moderada, com valores r de Pearson de 0.52 e 0.56, respectivamente. No entanto, para a safra 2016-2017, foi identificada uma correlação fraca entre o rendimento de grãos medido e previsto, com um valor r de Pearson igual a -0.21, o que significa que há relação forte entre as variáveis, mas não é linear. Por isso a correlação é baixa (Figura 16).

O maior coeficiente de correlação foi observado no ano agrícola 2018-2019, enquanto o menor coeficiente foi observado no ano agrícola 2016-2017. A correlação de Pearson para o primeiro foi positiva, enquanto para o segundo foi negativa. Essas diferenças podem ser explicadas pela quantidade de genótipos avaliados em cada safra, sendo 29 para a safra 2018-2019 e 22 para a safra 2016-2017. Isso sugere que a safra 2018-2019 teve um valor maior de correlação devido ao maior número de genótipos avaliados.

Reis et al. (2020), com o propósito de avaliar estatisticamente o desempenho do modelo DSSAT CSM-CROPGRO-Soybean em quatro diferentes localidades na região do MATOPIBA, conduziram uma análise baseada em três medidas estatísticas, considerando a estimativa da produtividade da cultura da soja durante o período compreendido entre os anos agrícolas de 1980/81 a 2012/13. Os resultados obtidos corroboram a eficácia das simulações realizadas pelo modelo, evidenciando uma coerente estimativa da produtividade da soja. No entanto, os coeficientes de correlação alcançados pelos autores, foram um pouco superiores aos alcançados neste estudo, com valores variando de 0,78 a 0,98 em cenários umidos e secos.

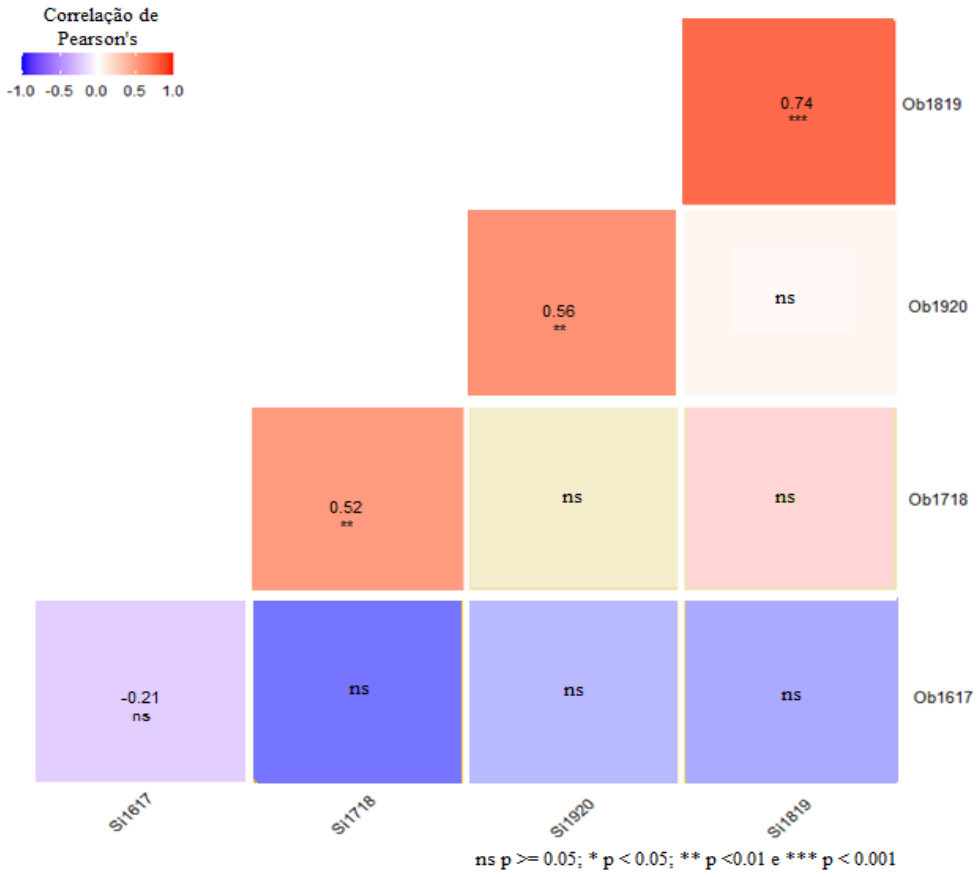


Figura 16 - Correlação de Pearson entre rendimento observado (Obs) e simulado (Si) (avaliações em 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020).

Durante os ciclos da soja, as cultivares receberam 585,96 mm (safra 16/17), 1.013,7 mm (safra 17/18), 1.053,4 mm (safra 18/19) e 874,8 mm (safra 19/20) de precipitação pluvial de maneira não homogênea (Figura 17), acarretando períodos de déficit hídrico ao longo do ciclo da cultura e, consequentemente, diferenciação no potencial produtivo das cultivares.

A avaliação do modelo DSSAT CSM-CROPGRO-Soybean na simulação do rendimento de grãos para cultivares de soja de tipo de crescimento determinado e indeterminado, mostrou uma distribuição semelhante entre o rendimento de grãos observado e estimado em todos os anos agrícolas avaliados (Figura 18). Os resultados mostraram que, em média, o modelo superestimou a produtividade de grãos em 19,83%, 2,93% e 2% para as safras 2016-2017, 2017-2018 e 2019-2020, respectivamente; No entanto, houve uma subestimação de 2,86% para a safra 2018-2019. Contudo, os valores indicaram um comportamento semelhante ao longo das safras entre as estimativas do modelo e os valores observados (Figura. 18A, B, C e D).

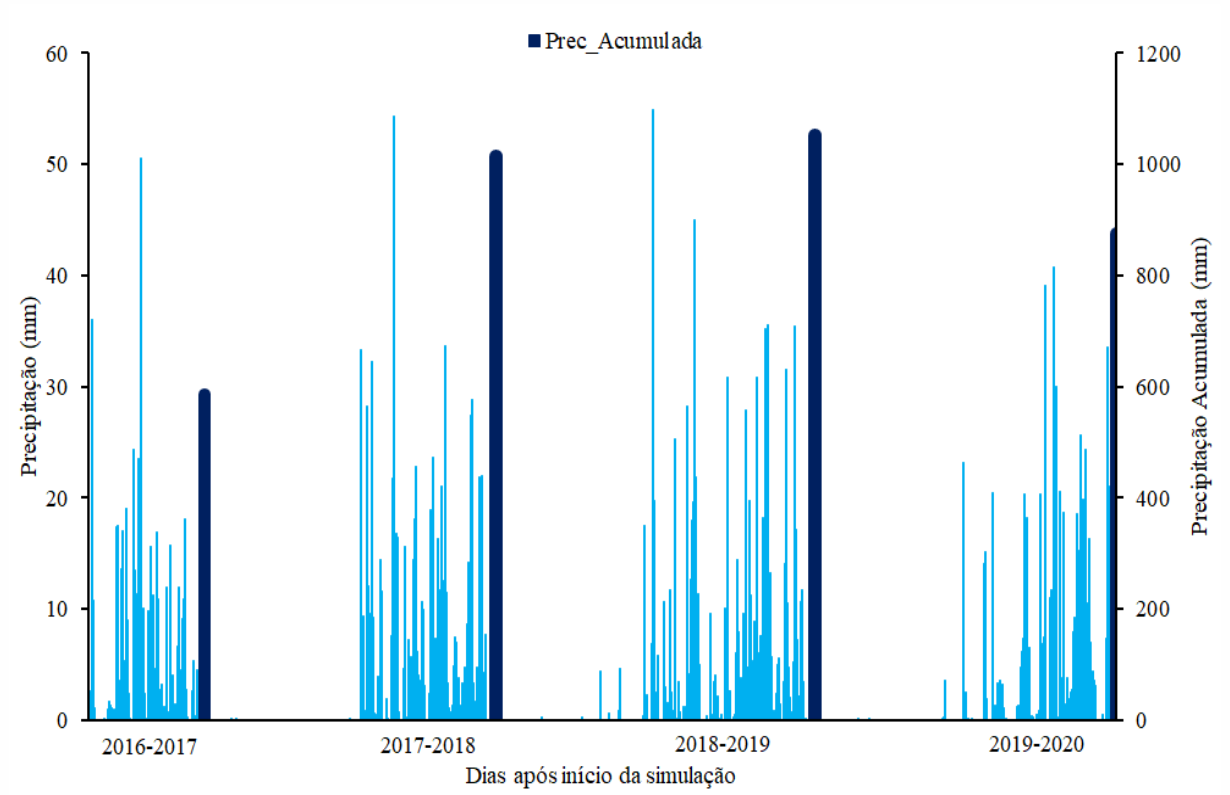


Figura 17 - Precipitação pluvial mensurada (barras azul-claro) e acumulada durante as safras (barras azul-escuro) nas áreas experimentais da fazenda comercial de soja avaliada nas safras 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020.

O primeiro ano agrícola (2016-2017) apresentou o menor rendimento médio mensurado (3.211,4 kg ha^{-1}) e consequentemente simulado (4.006 kg ha^{-1}), uma vez que o modelo conseguiu simular com boa acurácia os valores medidos no campo (Figura 18). Assim, levando em consideração que as variedades cultivadas foram plantadas durante o período recomendado para a região, a reduzida produtividade de grãos durante a safra 2016-2017, como evidenciado tanto nos resultados observados quanto nos simulados, provavelmente pode ter sido pelo menor volume de precipitação pluvial ocorrido no período (585,9 mm), contrastando com as condições registradas nos demais anos sob avaliação (Figura 17).

Os índices estatísticos obtidos para avaliar o desempenho do modelo apresentaram valores iguais a: RMSE = 924.59, 306.46, 276.20 e 298.59 kg ha^{-1}; d-Stat = 0.64, 0.80, 0.89 e 0.88, para os anos agrícolas 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020, respectivamente. Esses valores refletem a qualidade da correspondência entre as previsões do modelo e os dados observados. Salienta-se que, embora o modelo tenha apresentado uma tendência de superestimar a produtividade em algumas safras, as estimativas em geral foram próximas aos valores observados. Os índices estatísticos obtidos indicam uma correspondência razoável entre as previsões do modelo e os dados reais.

Os índices de concordância alcançados para o rendimento de grãos variando de 0.64 a 0.89, foram, de maneira geral, superiores aos valores obtidos por Talacuece et al. (2016) ao calibrar e autenticar o modelo CROPGRO-Soybean para estimativa de crescimento, desenvolvimento e produtividade de duas cultivares de soja. Os autores alcançaram valores de índice "d" de 0.68 e 0.71 para as cultivares Tgx 1740-2F e Tgx 1908-8F, respectivamente. Ressalta-se que naquele trabalho consideram apenas duas cultivares, e as mesmas cultivares utilizadas na calibração foram usadas na avaliação do modelo. Desse modo, os valores de índice "d" apresentados nesse estudo tendem a ser maiores, já que na avaliação do modelo foram utilizadas várias cultivares de tipo de crescimento determinado e indeterminado, cultivadas em fazenda comercial de soja da região.

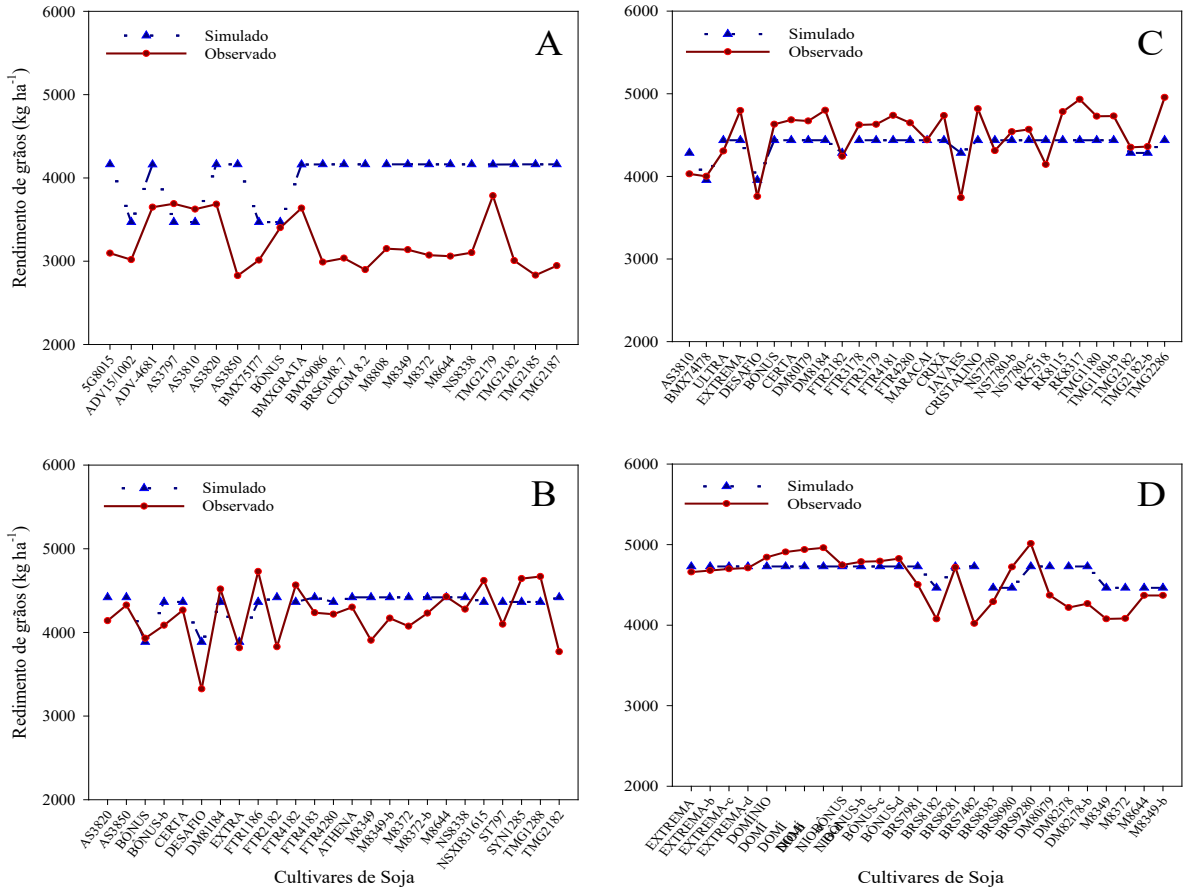


Figura 18 - Rendimento de grãos observado e simulado para cultivares de soja de tipo de crescimento determinado e indeterminado, das safras 2016-2017 (A), 2017-2018 (B), 2018-2019 (C) e 2019-2020 (D).

Ressalta-se também, que essa resposta de rendimento à parametrização realizada para as condições edafoclimáticas dessa região do estudo, pode ser causada principalmente pelos coeficientes que foram ajustados no modelo, buscando capturar substancialmente as estimativas de produtividade de grãos de soja para o cerrado piauiense. Contudo, há casos em que os padrões do modelo são considerados suficientes para prever o rendimento de grãos.

Boote et al. (2018), ao avaliarem a sensibilidade da modelagem do rendimento de grãos à temperatura elevada, relataram que para o modelo DSSAT/CROPGRO-Soybean nenhuma modificação foi considerada necessária após a avaliação em relação aos dados da soja cultivada em experimentos de ambiente controlado e iluminado pelo Sol. Por outro lado, Yan et al. (2020) fizeram uma pequena alteração (±5%) de cada parâmetro do modelo e observaram com base em vários parâmetros estatísticos, que o rendimento da cultura para todos os tratamentos avaliados pode ser adequadamente simulado pelo modelo DSSAT. Contudo, é crucial ressaltar que esses estudos foram conduzidos sob condições climáticas distintas. Enquanto o primeiro foi realizado em temperaturas elevadas, o segundo foi realizado em um ambiente de clima temperado, distinguido por uma temperatura anual média de aproximadamente 7 ºC a 8 ºC.

É pertinente destacar que o modelo avaliado no presente estudo se mostrou promissor e pode ser aplicado para a predição de produtividade de grãos de soja na região do cerrado piauiense, em situações tanto de baixa quanto de elevada precipitação pluviométrica durante o ciclo de cultivo. Silva et al. (2021) observaram que aplicação de irrigação plena em soja resultou em produtividade de grãos de 3.290 kg ha^{-1}, enquanto para tratamento com 50% das necessidades totais de água a produtividade de grãos foi de 1.379 kg ha^{-1}, indicando que o modelo foi capaz de simular com sucesso uma resposta semelhante ao déficit hídrico com uma diminuição no peso total da cultura e no rendimento de grãos.

Em geral, na condição de solo e clima característica do cerrado do Sudoeste Piauiense, o modelo superestimou os valores de rendimento de grãos observados. Segundo Battisti, Bender e Sentelhas (2019), a produtividade simulada diretamente pelo modelo quando calibrado por meio de experimentos em condições ideais de manejo e sem considerar outras perdas que não as derivadas dos fatores climáticos (produtividade atingível), como no presente caso, é esperado uma superestimativa do rendimento, uma vez que representa o rendimento máximo que pode ser alcançado pela cultura em regime de sequeiro. Nesse sentido, ao avaliar adaptações de manejo da cultura da soja utilizando o modelo DSSAT/CROPGRO-Soybean, Sciarresi et al. (2020) enfatizam que aumentar a intensidade e a qualidade da coleta de dados do solo em ensaios agronômicos ajudaria a reduzir a incerteza do modelo nas calibrações com dados regionais.

O presente estudo é o primeiro que simulou a produtividade da soja para as condições de solo, clima em épocas de semeadura distintas na região do cerrado do Sudoeste Piauiense. Sugere-se a continuidade das avaliações do modelo para o aperfeiçoamento dessa importante ferramenta, visando auxiliar os produtores e profissionais que atuam na área do planejamento e condução das lavouras de culturas anuais de grãos na região.

4.3 Utilização do modelo CSM-CROPGRO-Soybean para estimar épocas de semeadura da soja no cerrado piauiense.

Para o solo tipo 1, os resultados mostram de uma forma geral que na distribuição de frequência da produtividade de soja, as duas cultivares, BRS 8980 e Domínio, seguem aproximadamente o mesmo comportamento, em todos os municípios avaliados (Figura 19), com maiores valores de rendimento de grãos nas semeaduras realizadas no início do período indicado para a região pelo ZARC (MAPA, 2021).

Em função da variabilidade encontrada no cultivo sob as condições de manejo de sequeiro, pode-se inferir que isso ocorre em decorrência das variações de disponibilidade hídrica ocasionadas pela ocorrência de períodos de veranicos que geralmente se manifestam no mês de janeiro, corroborando com Báez et al. (2020), que observaram queda no rendimento de grãos de soja por causa do aumento do nível de déficit hídrico no solo.

Ao se comparar a produtividade média simulada para solo tipo 1 entre as duas cultivares ao longo dos 30 anos do estudo (Figura 19), para diferentes datas de semeadura, constata-se que em todos os municípios estudados, a cultivar BRS 8980 apresentou produtividade ligeiramente superior em semeaduras realizadas em novembro, enquanto a cultivar Domínio teve melhor desempenho em semeaduras realizadas em janeiro (final da janela de plantio da região). Isso, pode ser atribuído ao tipo de crescimento indeterminado da cultivar Domínio, capaz de aproveitar melhor a luz solar disponível em semeaduras mais tardias. Nesse sentido, Winck et al. (2020) relatam que qualquer diminuição na área foliar pode interferir de forma negativa o desenvolvimento e o crescimento da planta, induzindo alterações na atividade de acúmulo de matéria seca, diminuindo a produtividade.

Observou-se, no entanto, que houve alterações nos valores de produtividade de grãos para todos os municípios, com variações consideráveis entre as produtividades máximas e mínimas em todas as datas de semeadura, indicando que a disponibilidade hídrica, afeta significativamente o rendimento da cultura. Tal fato foi também observado por Pham et al. (2023), quando avaliaram como a variação climática afeta a produtividade da soja, destacando que a deficiência hídrica teve efeito significativo quanto ao desenvolvimento e o crescimento da soja, afetando o rendimento.

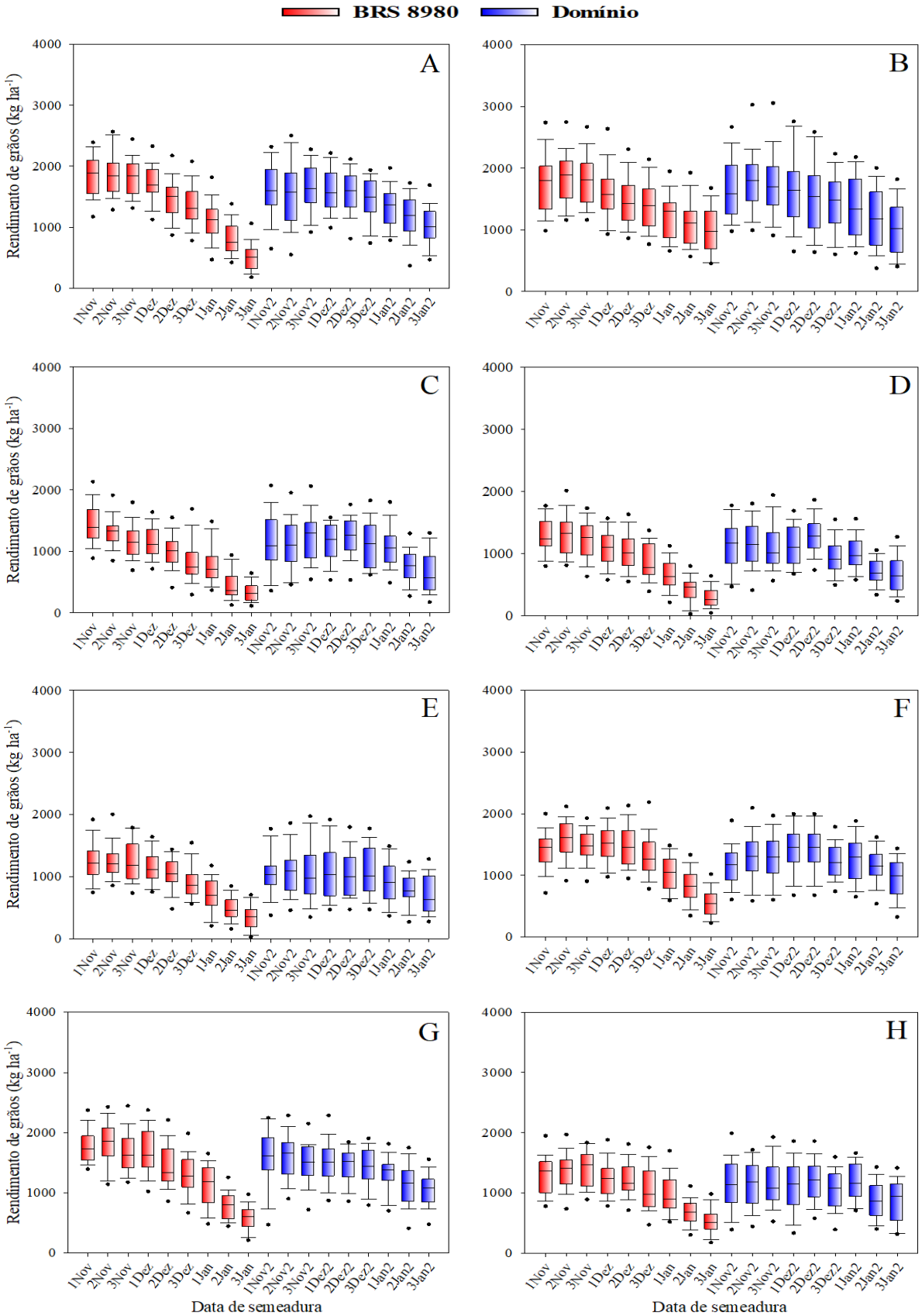


Figura 19 - Distribuição de frequência da produtividade de grãos de soja para as condições de solo tipo 1, designando os valores mínimos, máximos, medianos e percentis, para variadas datas de semeadura, em cultivo de sequeiro. A= Baixa Grande do Ribeiro, B= Bom Jesus, C= Currais, D= Monte Alegre do Piauí, E= Palmeira do Piauí, F= Ribeiro Gonçalves, G= Santa Filomena e H= Uruçuí.

Da mesma forma, ao estudar a cultura da soja cultivada sob estresse térmico e déficit hídrico, Ergo et al. (2018) concluíram que o déficit hídrico reduziu a produtividade de soja e seus componentes número e peso de grãos. Destaca-se que as datas de semeadura avaliadas compreendem o período chuvoso da região, e a variabilidade observada nas produtividades se dá em função da ocorrência de secas em determinado ano ou a má distribuição das precipitações pluvial durante o ciclo da cultura. Percebe-se que, a variabilidade entre as datas de semeadura é muito considerável, evidenciando a predominância da influência do regime pluviométrico sobre a produtividade da cultura da soja em detrimento a outros fatores, considerando que trata-se de um solo tipo 1, com menor disponibilidade hídrica à cultura.

A Figura 20 apresenta as distribuições de frequência da produtividade de grãos de soja simulada, considerando as condições do tipo de solo tipo 2, em um período de 30 anos para diferentes datas de semeadura em manejo de sequeiro nos oito municípios avaliados. Assim como no solo tipo 1, o rendimento da soja apresentou variações consideráveis nas condições do solo tipo 2 em todos os municípios avaliados. Os valores médios de produtividade da cultivar BRS 8980 oscilaram entre 57 e 4.102 kg ha^{-1}, enquanto para a cultivar Domínio variaram de 366 a 4.184 kg ha^{-1}. O município de Bom Jesus apresentou as maiores produtividades para ambas as cultivares (Figura 20B), enquanto o município de Monte Alegre apresentou as menores (Figuras 20D).

Exceto o município de Bom Jesus, no qual a produtividade para as duas cultivares apresentou menor variabilidade, todos os demais municípios apresentaram níveis semelhantes de produtividade e variabilidade (Figura 20), considerando as condições de solo utilizadas e a categoria de crescimento das cultivares utilizadas nas simulações. No entanto, os resultados deixam claro que, dentro de um mesmo município, as condições climáticas tiveram um impacto significativo na produtividade da soja, uma vez que são afetados basicamente pelos mesmos fenômenos meteorológicos.

Considerando as características dos insumos empregados nas simulações e o uso do grupo de maturidade de cultivares adaptadas para várias regiões brasileiras, Battisti e Sentelhas (2019) ao caracterizarem os territórios produtores de soja do Brasil por padrões de déficit hídrico, também identificaram que regiões com características similares apresentaram uma grande variabilidade da produtividade da soja dentro de um mesmo estado, em função das condições climáticas observadas.

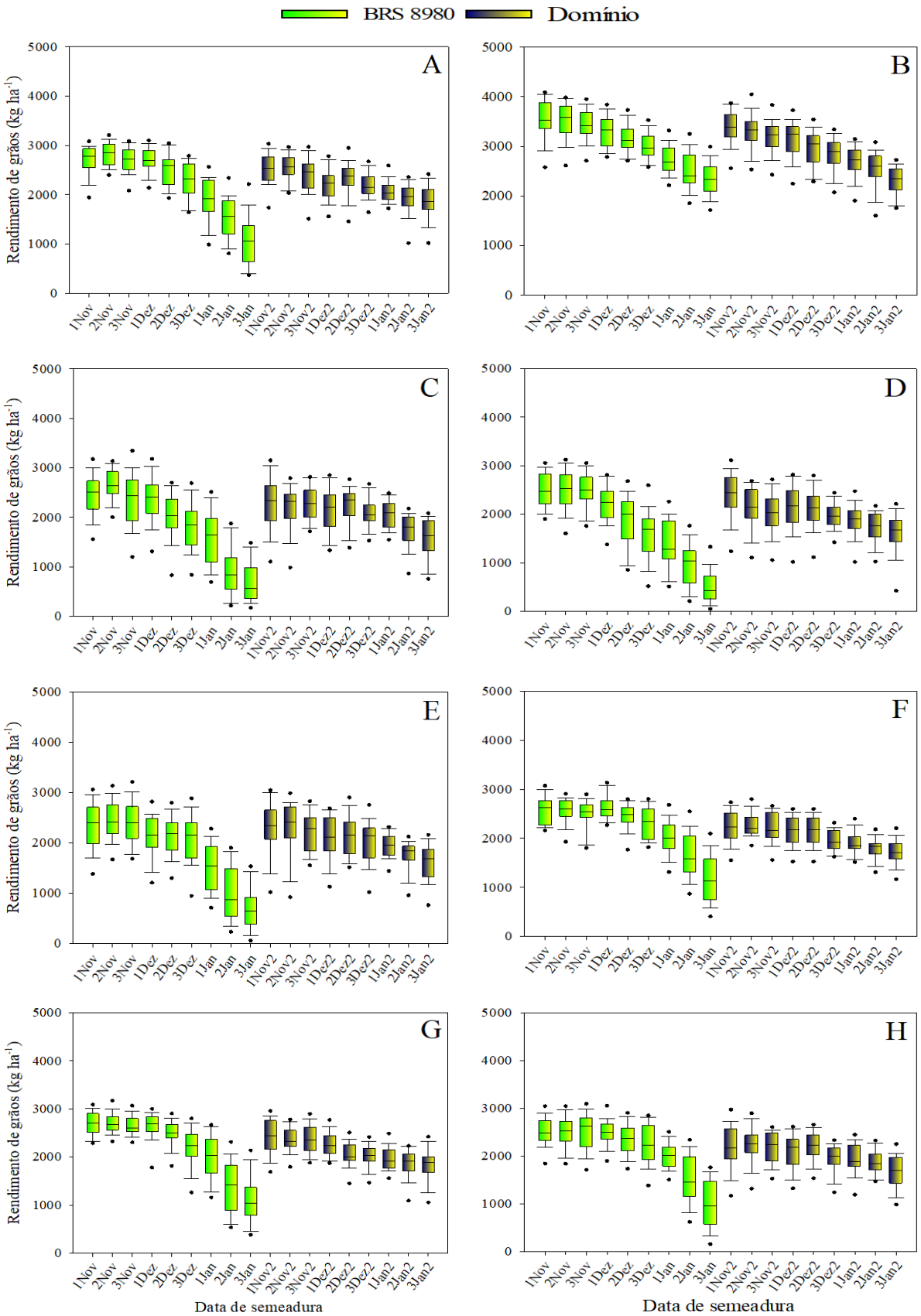


Figura 20 - Distribuição de frequência da produtividade de grãos de soja para as condições de solo tipo 2, indicando valores mínimos, máximos, medianos e percentis, para diferentes datas de semeadura, em regime de sequeiro. A= Baixa Grande do Ribeiro, B= Bom Jesus, C= Currais, D= Monte Alegre do Piauí, E= Palmeira do Piauí, F= Ribeiro Gonçalves, G= Santa Filomena e H= Uruçuí.

No mesmo sentido, Eulenstein et al. (2017) estimando tendências de produtividade da soja em cenários de mudanças climáticas por meio de simulações com o modelo CROPGRO-Soybean, concluíram que o impacto dos cenários climáticos sobre a produtividade da soja foi diretamente influenciado pela localização.

Verifica-se ainda, que as semeaduras realizadas no mês de novembro apresentaram maior produtividade de grãos e estabilidade para as duas cultivares analisadas (Figura 20). Isso justifica este ser o período recomendado para a semeadura da cultura na região do Sudoeste Piauiense, a qual possui classificação climática Aw tropical de savana, de acordo com o sistema de Köppen. A precipitação pluvial média anual na região é em torno dos 700 a 1.200 mm e o período chuvoso ocorre de novembro a maio, de acordo com Andrade Júnior et al. (2005).

Por outro lado, as semeaduras em janeiro apresentaram queda considerável na produtividade de grãos, possivelmente por causa da menor precipitação pluvial no final do período chuvoso. Apesar de a região possuir período chuvoso bem definido, ocorre forte variabilidade na distribuição das precipitações pluviais durante o período de cultivo da soja, gerando veranicos capazes de interferir na produtividade de grãos.

Os dados mostram que o rendimento da soja cultivada em Solo Tipo 3 apresentou menores variações entre as épocas de semeadura em todos os municípios avaliados, o que se deve à maior capacidade de água disponível do solo (Figura 21). Nesse sentido, as variações de risco, em relação às datas de semeadura foram significativamente reduzidas em comparação aos resultados observados nas condições de solo tipo 1 e tipo 2. Identificou-se que houve maiores variações na cultivar BRS 8980 apenas em semeaduras realizadas no segundo e terceiro decêndio de janeiro, enquanto para a cultivar Domínio, essas variações ocorreram somente nos municípios de Currais, Monte Alegre e Palmeira do Piauí, porém de menores montas.

Os resultados das simulações mostraram que o município de Bom Jesus, PI, no solo tipo 3, apresentou as maiores produtividades de soja para as duas cultivares avaliadas, em cada data de semeadura testada. Considerando todas as datas de semeadura para esse município, o rendimento de grãos variou de 3.153 kg ha^{-1} (terceiro decêndio de janeiro) a 4.554 kg ha^{-1} (primeiro decêndio de novembro), para a cultivar de crescimento determinado e de 2.573 kg ha^{-1} (primeiro decêndio de janeiro) a 4.944 kg ha^{-1} (primeiro decêndio de novembro), para a cultivar de tipo de crescimento indeterminado. É importante ressaltar que mesmo nas simulações realizadas em datas mais tardias, o rendimento em Bom Jesus foi superior ao dos outros municípios avaliados.

De fato, de acordo com Battisti et al. (2018), há uma grande variabilidade no rendimento de grãos de soja entre as fazendas brasileiras, mesmo numa mesma região, conforme observado

por esses autores em estudo sobre estimativa da diferença de rendimento de grãos de soja entre 200 fazendas no Brasil. Portanto, os resultados obtidos neste estudo são relevantes para aprimorar técnicas de cultivo e incrementar a produtividade da soja na região.

A possível explicação para a pequena diferença no rendimento de grãos entre as datas de semeadura para esse tipo de solo, é a maior capacidade de água disponível no solo, que aumentaram a disponibilidade hídricas às plantas, principalmente nos momentos de insuficiência do volume pluviométrico. Alves et al. (2021), avaliando o crescimento e a produtividade de uma nova variedade de soja, cultivadas em condições diferentes de deficiência hídrica no solo, concluíram que os tratamentos com menor restrição hídrica foram responsáveis pela melhor produção e crescimento das plantas.

Ao analisar a Figura 21, percebe-se uma maior assimetria na parte inferior. Foi constatado a presença de dados discrepantes, com valores menores de rendimento de soja, especialmente para a cultivar BRS 8980. É importante salientar que as variações climáticas exercem um impacto significativo na produtividade, podendo tanto aumentá-la quanto diminuí-la. Como exemplo, pode-se citar as cidades adjacentes de Bom Jesus (Figura 21B) e Currais (Figura 21C), as quais apresentam comportamentos de variabilidade bastante distintos. Esse fenômeno pode ser atribuído à quantidade e distribuição das precipitações pluviais em cada localidade.

Para todos os municípios avaliados, considerando os três tipos de solo, as semeaduras praticadas nos meses de novembro e dezembro resultaram em maiores rendimentos. Por outro lado, verificou-se que o último decêndio de janeiro apresentou perdas significativas de produtividade em todos os municípios e anos analisados.

Percebe-se, então, que as diferentes formas de crescimento das cultivares resultaram em distintos níveis de rendimento nos três tipos de solo simulados em todos os municípios pesquisados. Observou-se que a cultivar Domínio (crescimento indeterminado) apresentou os maiores rendimentos, o que pode ser explicado pelo seu maior tempo de emissão de vagens. Essa cultivar possui uma característica distintiva: aproximadamente metade da estatura final das plantas é alcançada, até o começo do florescimento. Portanto, após esse estágio, a planta continua crescendo significativamente, com a produção de nós no caule principal, o que possibilita dobrar sua altura até a maturação (EMBRAPA, 2021).

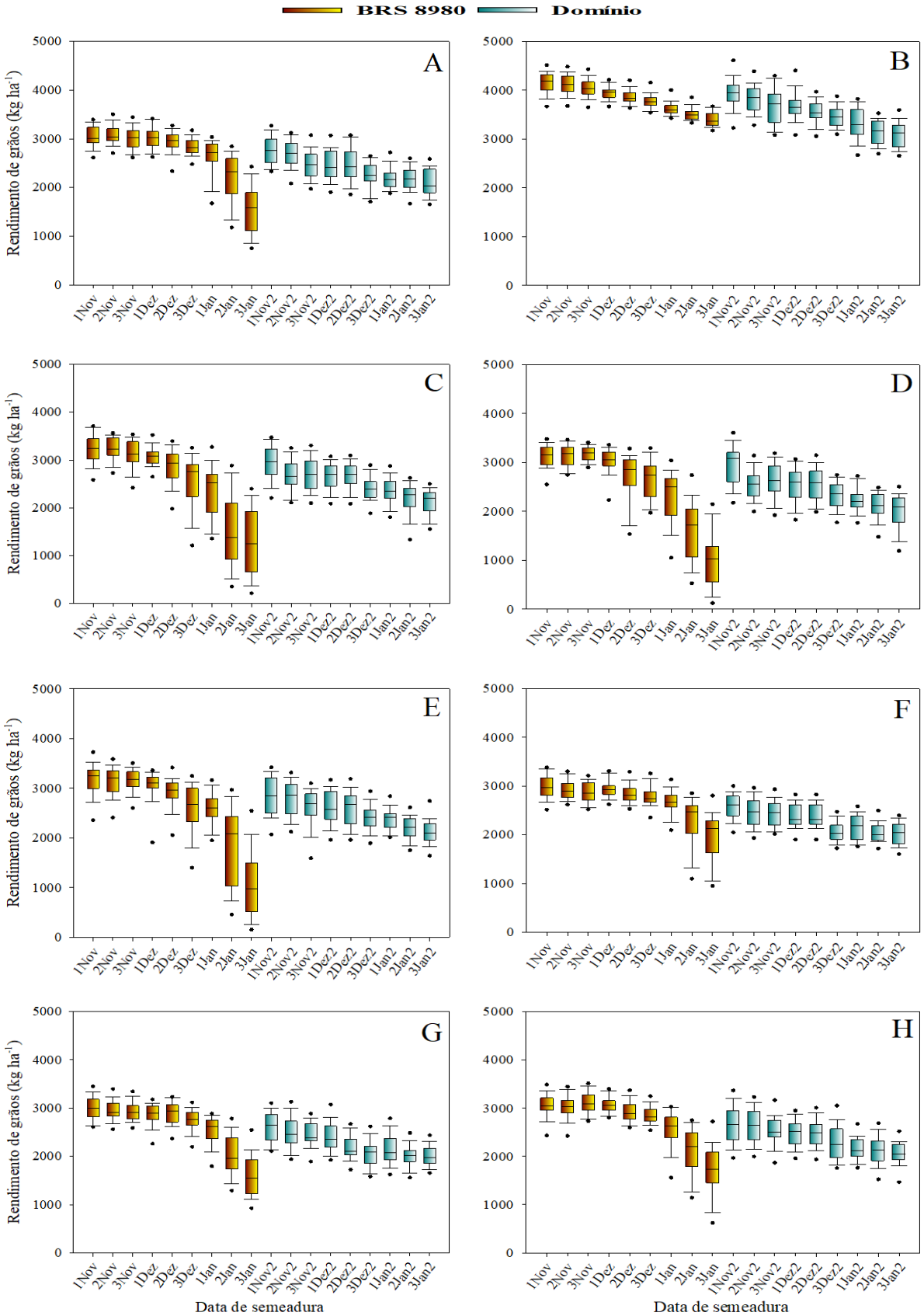


Figura 21 - Distribuição de frequência da produtividade de grãos de soja para as condições de solo tipo 3, indicando valores mínimos, máximos, medianos e percentis, para diferentes datas de semeadura, em regime de sequeiro. A= Baixa Grande do Ribeiro, B= Bom Jesus, C= Currais, D= Monte Alegre do Piauí, E= Palmeira do Piauí, F= Ribeiro Gonçalves, G= Santa Filomena e H= Uruçuí.

A simulação do ciclo da cultivar BRS 8980 revelou um padrão semelhante de encurtamento do ciclo da soja em todos os municípios avaliados (Tabela 10), embora identifique-se pequenas diferenças entre os municípios. Verificou-se que as semeaduras realizadas no primeiro decêndio de novembro apresentaram ciclos mais longos, enquanto as semeaduras mais tardias resultaram em ciclos mais curtos.

Em média, o ciclo foi reduzido em 16,4% considerando todos os municípios. Por exemplo, no município de Currais, a semeadura no primeiro decêndio de novembro resultou em um ciclo de 158 dias, enquanto no município de Santa Filomena, a semeadura no terceiro decêndio de janeiro resultou em um ciclo de 123 dias. Além disso, observou-se que o tipo de solo também influenciou a duração do ciclo, com ciclos mais longos no solo tipo 1 em comparação com os Solos 2 e 3 na maioria dos decêndios de semeadura, e ciclos muito próximos quando comparados Solos 2 e 3, ora um resultando em maiores ciclos ora outro (conforme apresentado na Tabela 10).

Tabela 10 - Duração do ciclo da cultivar de soja BRS 8980, simulado em função das datas de semeadura, correspondente aos municípios piauienses de Baixa Grande do Ribeiro, Bom Jesus, Currais, Monte Alegre do Piauí, Palmeira do Piauí, Ribeiro Gonçalves, Santa Filomena e Uruçuí.

Município	Tipo de Solo	Decêndios de Semeadura								
		Novembro			Dezembro			Janeiro		
		1°	2º	3°	1°	2º	3°	1°	2º	3°
		Duração do Ciclo da Soja (dias)								
Baixa Grande do Ribeiro	S1	152	150	148	145	141	137	134	130	127
	S2	151	149	146	144	140	136	133	130	125
	S3	150	148	146	144	141	138	136	131	126
Bom Jesus	S1	154	153	150	146	142	140	136	133	131
	S2	151	149	147	144	141	138	134	131	128
	S3	150	149	147	143	140	138	135	132	129
Currais	S1	158	155	151	149	145	140	138	133	133
	S2	156	153	150	148	142	139	136	131	129
	S3	155	152	150	147	143	140	138	131	128
Monte Alegre do Piauí	S1	154	152	148	146	140	137	134	130	127
	S2	152	149	147	144	138	135	132	127	123
	S3	150	149	147	144	139	136	133	128	123
Palmeira do Piauí	S1	157	155	152	149	145	141	138	135	132
	S2	153	152	150	147	143	140	135	132	128
	S3	153	152	150	147	143	140	137	133	126
Ribeiro Gonçalves	S1	150	148	146	144	140	137	133	129	126
	S2	148	146	144	142	139	136	133	128	125
	S3	147	146	144	142	139	137	134	130	127
Santa Filomena	S1	151	148	146	143	139	135	132	128	124

	S2	149	147	144	142	138	135	133	126	123
	S3	148	147	143	142	138	136	133	128	124
Uruçuí	S1	152	150	148	145	141	137	135	130	130
	S2	149	147	146	144	139	137	134	129	125
	S3	149	146	145	143	140	137	134	130	127

S1= solo tipo 1 (0,40 mm cm^{-1} de AD), S2= solo tipo 2 (0,66 mm cm^{-1} de AD) e S3= solo tipo 3 (1,21 mm cm^{-1} de AD).

É importante ressaltar que os fatores ambientais têm um impacto direto no crescimento das plantas e podem variar de diferentes formas ao longo das fases de desenvolvimento da cultura. Nesse sentido, Souza et al. (2018) enfatizam que a queda na produtividade da soja em semeaduras tardias pode ser atribuída a uma menor disponibilidade de recursos naturais, como água e nutrientes, durante períodos cruciais para o desenvolvimento da planta. Assim, é fundamental compreender a interação entre os elementos climáticos e a agricultura para maximizar a produção e minimizar os riscos.

A simulação da duração do ciclo para a cultivar Domínio também mostrou efeitos da época de semeadura e do tipo de solo sobre o ciclo da soja em todos os municípios avaliados, bem como diferenças entre os próprios municípios (Tabela 11). Assim como a cultivar BRS 8980, a cultivar Domínio teve ciclos mais longos quando as semeaduras foram realizadas no primeiro decêndio de novembro, havendo redução do ciclo à medida que se atrasava a semeadura, resultando em ciclos mais curtos nas semeaduras mais tardias. No entanto, tanto os ciclos mais longos quanto os mais curtos da cultivar Domínio foram consideravelmente menores do que os da cultivar de crescimento determinado, BRS 8980.

O maior ciclo para a cultivar Domínio foi observado no município de Currais, onde a semeadura realizada no primeiro decêndio de novembro teve uma duração de 133 dias, enquanto nos municípios de Monte Alegre e Santa Filomena, a semeadura no terceiro decêndio de janeiro resultou em um ciclo de 110 dias.

A cultivar de crescimento determinado apresentou um ciclo mais longo, resultando em um período maior para atingir a maturidade fisiológica. No entanto, quando foram semeadas no final da janela de plantio da região, ambas as cultivares tiveram seus ciclos reduzidos. Essa tendência foi observada em todos os cenários de solos avaliados e em todos os municípios analisados. Essas informações são relevantes para os produtores, pois podem auxiliá-los na tomada de decisões, especialmente ao planejar dois cultivos em um mesmo ano agrícola (safrinha). Além disso, esses dados também podem subsidiar órgãos responsáveis pelo planejamento e financiamento, na formulação de novas políticas públicas com o objetivo de promover a sustentabilidade do cultivo da soja no cerrado do Sudoeste piauiense.

Tabela 11 - Duração do ciclo da cultivar de soja Domínio, simulado em função das datas de semeadura, correspondente aos municípios piauienses de Baixa Grande do Ribeiro, Bom Jesus, Currais, Monte Alegre do Piauí, Palmeira do Piauí, Ribeiro Gonçalves, Santa Filomena e Uruçuí.

Município	Tipo de Solo	Decêndios de Semeadura								
		Novembro			Dezembro			Janeiro		
		1°	2º	3°	1°	2º	3°	1°	2º	3°
		Duração do Ciclo da Soja (dias)								
Baixa Grande do Ribeiro	S1	130	128	126	125	124	120	118	114	111
	S2	129	127	126	124	124	120	119	114	113
	S3	128	127	125	125	124	120	119	116	114
Bom Jesus	S1	131	130	127	124	122	121	118	115	112
	S2	129	128	126	124	121	120	117	114	112
	S3	129	128	126	124	122	120	117	115	113
Currais	S1	133	130	129	127	128	121	119	115	113
	S2	131	129	128	126	126	121	119	115	112
	S3	132	129	128	127	127	123	120	116	114
Monte Alegre do Piauí	S1	130	129	127	126	125	119	117	113	110
	S2	129	128	125	124	124	119	117	112	110
	S3	130	128	126	125	124	119	118	114	111
Palmeira do Piauí	S1	132	130	127	127	127	122	119	116	113
	S2	130	129	126	126	126	122	119	115	113
	S3	131	129	127	126	126	122	120	117	115
Ribeiro Gonçalves	S1	128	125	124	124	124	119	117	115	111
	S2	126	124	123	123	123	119	117	115	111
	S3	126	124	123	123	123	119	117	116	113
Santa Filomena	S1	128	126	124	124	121	118	117	113	110
	S2	128	126	124	123	120	118	117	113	111
	S3	128	126	124	123	121	119	117	114	112
Uruçuí	S1	129	127	126	125	124	120	118	114	112
	S2	128	126	124	124	123	119	118	115	111
	S3	127	126	125	124	123	119	118	116	113

S1= solo tipo 1 (0,40 mm cm^{-1} de AD), S2= solo tipo 2 (0,66 mm cm^{-1} de AD) e S3= solo tipo 3 (1,21 mm cm^{-1} de AD).

As relações entre os elementos climáticos e a produção agrícola são bastante complexas, existindo um efeito direto dos fatores ambientais no crescimento e desenvolvimento das plantas de diferentes formas e nas diversas fases da cultura (SOUZA et al., 2018). Portanto, a redução no rendimento observada em semeaduras tardias pode ser consequência do encurtamento do ciclo da cultivar, impactando negativamente a produção de grãos. Esses resultados corroboram com os obtidos por Battisti et al. (2018), os quais afirmaram que os ciclos mais longos resultaram em maiores rendimentos em comparação com o ciclo mais curto em todos os cenários climáticos estudados. Essas conclusões foram obtidas ao avaliarem estratégias de

manejo de culturas visando aprimorar a resiliência da soja às mudanças climáticas na região sul do Brasil.

O processo de avaliação da consistência da variabilidade da produtividade de soja observada em relação aos rendimentos simulados foi realizado por meio da comparação entre os rendimentos simulados para o município de Bom Jesus e os rendimentos observados em uma fazenda comercial de soja localizada na Serra do Quilombo, no mesmo município. Verificou-se uma moderada correspondência entre os rendimentos de soja medidos e simulados quando consideramos os Solos dos Tipos 1 e 2 (Figura 22). Destaca-se que os rendimentos mais baixos estiveram associados ao Solo Tipo 1, enquanto os rendimentos mais elevados estiveram relacionados ao Solo Tipo 2.

Esse resultado é evidenciado pelas características físicas dos solos do cerrado, os quais apresentam alta profundidade e porosidade, permitindo uma elevada capacidade de infiltração de água. No entanto, apesar desse alto índice de infiltração, há uma quantidade limitada de armazenamento de água, conforme relatado por Sena et al. (2021). Com base nos rendimentos de soja (média) obtidos ao longo de um período de dezessete anos para o município de Bom Jesus (Figura 22), foi observado que, no solo do Tipos 3, os valores de produtividade simulados foram superestimados em relação aos valores observados, principalmente nas semeaduras realizadas nos meses de novembro e dezembro.

Além disso, para esse tipo de solo, houve uma menor variabilidade nos valores de rendimento simulados, o que pode ser atribuído, sem dúvida, à maior disponibilidade de água promovida nesse solo mencionado. Ao abordar o zoneamento de risco climático para o cultivo da soja no cerrado, Melo et al. (2020) confirmaram essa relação ao concluir que os solos com maior capacidade de retenção de água apresentam menor probabilidade de sofrer com déficit hídrico. Essa capacidade garante o suprimento adequado de água para a cultura durante um período prolongado.

O maior rendimento de soja medido pela fazenda nos dezessete anos avaliados foi na safra 2018 de 4.020,00 kg ha^{-1} e o menor foi observado na safra 2016 de 895,2 kg ha^{-1}. Essa diferença proporcionou uma variabilidade entre os rendimentos medidos bem maior do que a variabilidade simulada nesse período. Contudo, para os solos dos Tipos 1 e 2, os valores de rendimento simulados, tanto para a cultivar BRS 8980 quanto para a cultivar Domínio, ficaram dentro dessa faixa de valores medidos na fazenda, ratificando a congruências dos resultados apresentados nesse estudo.

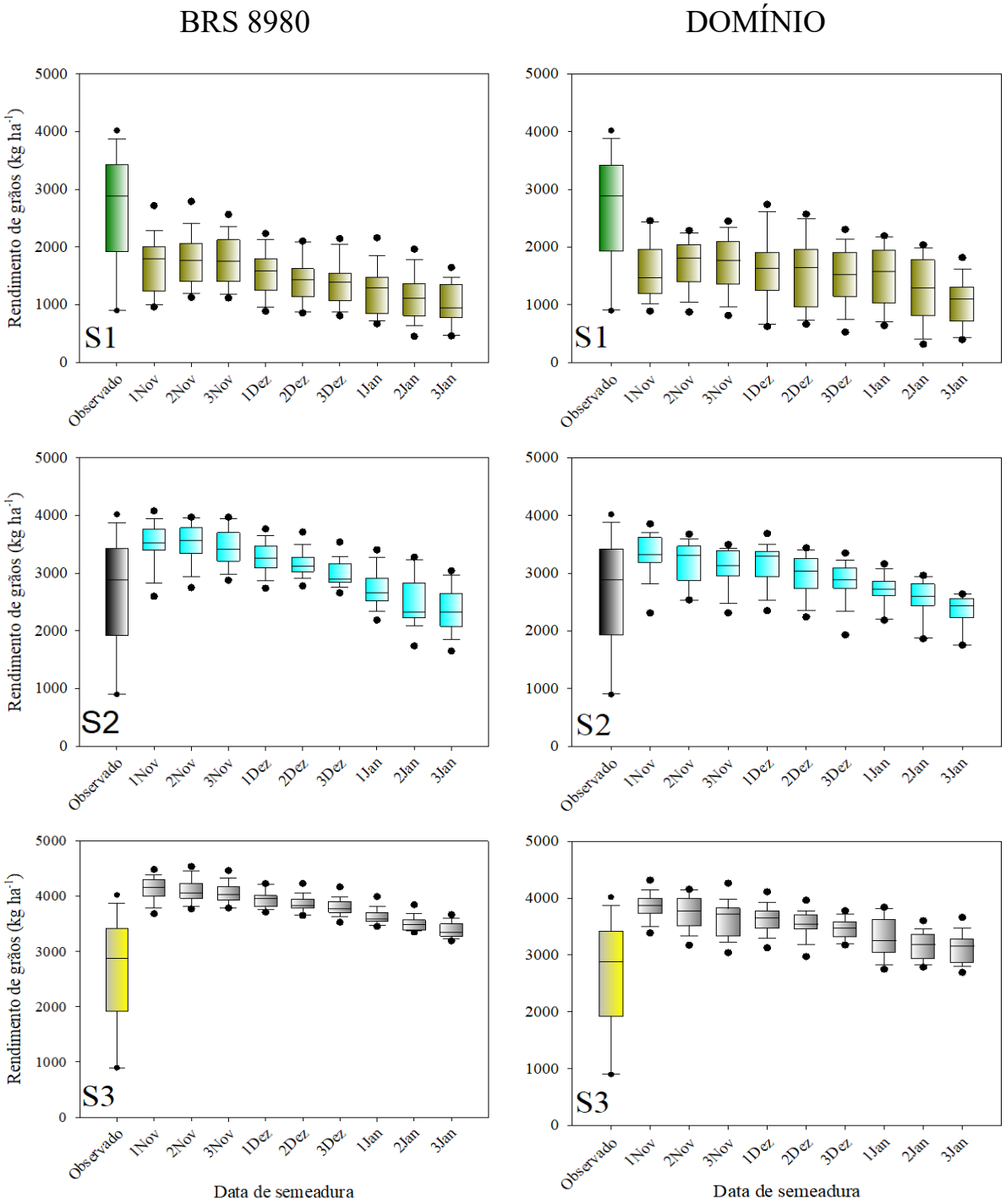


Figura 22 - Distribuição de frequência da produtividade média de grãos de soja observado pelo produtor na Serra do Quilombo e a produtividade média de grãos de soja simulada para o município de Bom Jesus, PI, durante 17 safras. S1= solo tipo 1 (0.40 mm cm^{-1} de AD), S2= solo tipo 2 (0.66 mm cm^{-1} de AD), S3= solo tipo 3 (1.21 mm cm^{-1} de AD), Rendimento observado: e Rendimento simulado:

De maneira geral, verificou-se que o modelo utilizado foi capaz de capturar de maneira consistente o rendimento de grãos de soja em comparação com as medições realizadas pelo produtor. Esse resultado foi especialmente notável para o Solo do Tipo 2, o qual possui semelhanças com o solo da fazenda comercial de soja utilizada na avaliação, classificado como

D3 de acordo com Instrução Normativa SPA/MAPA Nº 1, de 21 de junho de 2022 (MAPA, 2022). Portanto, apesar da consistência geral do modelo utilizado neste estudo, é importante considerar que existem diferenças e peculiaridades entre as condições específicas de cultivo, que podem levar a discrepâncias nos resultados obtidos, como foi observado no Solo Tipo 3.

Destaca-se a necessidade de desenvolver métodos alternativos para monitorar o considerável aumento da produtividade de soja na região do cerrado do Sudoeste piauiense, bem como possíveis reduções no rendimento por causa das flutuações climáticas. Nesse contexto, a modelagem agroclimática desponta como a alternativa mais promissora, uma vez que é uma ferramenta capaz de gerar suposições e fornecer informações sobre a influência das variações climáticas nas culturas ao longo dos anos. Os resultados aqui apresentados demonstram o potencial dessa ferramenta, uma vez que a simulação do rendimento de soja em diferentes datas de semeadura permitiu uma avaliação da variabilidade da produtividade nos mais diversos cenários.

Constata-se, portanto, que, para cultivos de sequeiro, o fator crucial na determinação das melhores datas de semeadura é a disponibilidade e a distribuição adequada de água ao longo do ciclo da cultura. De acordo com Nóia Júnior e Sentelhas (2019), tanto a antecipação quanto o atraso na semeadura da soja resultam em perdas de produtividade. Ao analisar as melhores épocas de semeadura para a sucessão soja-milho em diversas regiões produtoras do Brasil, esses pesquisadores concluíram que a data de semeadura pode variar de acordo com a região.

A utilização do modelo de simulação para avaliar o rendimento de grãos de soja em cultivo de sequeiro permitiu não apenas a identificação das datas mais favoráveis de semeadura para cada município, mas também a estimativa da produtividade da cultura. Esses resultados sugerem que a escolha da melhor data de semeadura para a região pode variar de acordo com o nível de risco que o tomador de decisão está disposto a assumir, especialmente ao considerar a possibilidade de cultivos safrinha em um determinado ano agrícola. Essa abordagem permite uma análise mais precisa das melhores épocas de semeadura, considerando as características específicas de cada município e a variabilidade do rendimento da cultura.

5 CONCLUSÃO

Os índices estatísticos indicam que as cultivares BRS 8980 (1ª época de semeadura) e Bônus (3ª época de semeadura) apresentaram maior eficiência no processo de calibração;

A produção estimada de biomassa seca da parte aérea refletiu adequadamente o decréscimo na produção de grãos em função da data de semeadura, com datas mais tardias apresentando maior exposição à deficiência hídrica e menor crescimento;

O rendimento de grãos foi superestimado pelo modelo, mas replicou bem a oscilação em função das datas de semeadura, padrão similar à biomassa seca, e foi consistente em simulações de outras safras e cultivares;

As semeaduras mais tardias resultaram em estimativas de ciclos mais curtos, com diferenças de duração dos ciclos de 16,4% e 13,1% para as cultivares BRS 8980 e Domínio, respectivamente;

A variabilidade do rendimento de soja estimado pelo modelo foi semelhante aos dados coletados por um produtor rural da zona rural de Bom Jesus, PI, principalmente para os solos dos Tipos 1 e 2;

Conclui-se que o modelo DSSAT CSM-CROPGRO-Soybean simulou satisfatoriamente a evolução da biomassa seca da parte aérea e o rendimento de grãos de soja nas circunstâncias da região do cerrado do Sudoeste Piauiense.

REFERÊNCIAS

ALVES, E. S.; RODRIGUES, L. N.; OLIVEIRA, R. A.; LORENA, D. R. Water deficit on the growth and yield of irrigated soybean in the Brazilian cerrado region. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, p. 750-757, 2021.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; BARROS, A. H. C.; SILVA, C. O.; GOMES, A. A. N. Classificação climática e regionalização do semi-árido do Estado do Piauí sob cenários pluviométricos distintos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 36, p. 143-151, 2005.

ASSENG, S.; EWERT, F.; WOLF, J. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 827-832, 2013.

ASSENG, S.; EWERT, F.; MARTRE, P. et al. Rising temperatures reduce global wheat production. **Nature Climate Change**, v 5, p. 143-147, 2015.

AWAN, Z. A.; KHALIQ, T.; AKHTAR, M. M.; IMRAN, A.; IRFAN, M.; AHMED, M. J.; AHMAD, A. Building climate-resilient cotton production system for changing climate scenarios using the DSSAT Model. **Sustainability**, v. 13, p. 10495, 2021.

BÁEZ, M. S. A.; PETRY, M. T.; CARLESSO, R.; BASSO, L. J.; ROCHA, M. R.; RODRIGUEZ, G. J. Balanço hídrico e produtividade da soja cultivada sob diferentes níveis de déficit hídrico no Sul do Brasil. **Investigación Agraria**, v. 22, p. 03-12, 2020.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; PROCÓPIO, S. O.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; PANISON, F. Semeadura cruzada em cultivares de soja com tipo de crescimento determinado. **Semina**, v. 36, p. 1215-1226, 2015.

BARBIERI, J. D.; DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L.; TIEPPO, R. C.; SILVA ANDREA, M. C.; SEABRA JUNIOR, S. Simulação da produtividade e de épocas de semeadura para soja e milho em eventos de El niño Oscilação Sul no estado de Mato Grosso. **Acta Iguazu**, v. 9, p. 45-66, 2020.

BATTISTI, R.; BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Assessment of different gridded weather data for soybean yield simulations in Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 135, p. 237-247, 2019.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. **Field Crops Research**, v. 240, p. 95-105, 2019.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation model sand their ensemble in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 200, p. 28-37, 2017.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PARKER, P. S.; NENDEL, C.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; BASSO, C. J. Assessment of crop-management strategies to improve soybean resilience to climate change in Southern Brazil. **Crop and Pasture Science**, v. 69, p. 154-162, 2018.

BENDER, E. P.; BATISTA, J. N.; LYRA, G. B.; POLIDORO, J. C.; JANTALIA, C. P.; LYRA, G. B. Modelagem do crescimento e produtividade do algodão em cultivo comercial no cerrado baiano. **Nativa**, v. 8, p. 403-412, 2020.

BINOTO, P.; MENEGAT, N.; LAJÚS, C. R. Eficiência da otimização nutricional de cultivares de soja (*Glycine max* (l.) Merrili) com hábito de crescimento determinado e indeterminado submetidas à adubação nitrogenada. **Unoesc & Ciência**. v. 9, p. 41-48, 2018.

BOOTE, K. J.; PRASAD, V.; ALLEN JÚNIOR, L. H.; SINGH, P.; JONES, J. W. Modeling sensitivity of grain yield to elevated temperature in the DSSAT crop models for peanut, soybean, dry bean, chickpea, sorghum, and millet. **European Journal of Agronomy**, v. 100, p. 99-109, 2018.

BOHN, N. P.; LUSTOSA FILHO, J. F.; NÓBREGA, J. C. A.; CAMPOS. A. R.; NÓBREGA, R. S. A.; PACHECO, L. P. Identificação de cultivares de soja para a região sudoeste do Cerrado piauiense. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 10, p. 10:1, 2016.

BOSSOLANI, J. W.; MENEGHETTE, H. H. A.; SANCHES, I. R.; SANTOS, F. L.; PARRA, L. F.; LAZARINI, E. Sowing date changes phenological development, plastochron index, and grain yield of soybeans under Cerrado conditions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, p. 488-494, 2022.

BOTTEGA, E. L.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de soja no Cerrado brasileiro. **Revista Agrarian**, v.6, p.167-177, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Programa Nacional de Zoneamento Agrícola de Risco Climático** - Zarc. Brasília, DF. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias-2022/publicado-zoneamento-agricola-da-soja-safra-2022-2023. Acesso em: 08 mai. 2023.

CAPONE A.; DARIO, A. S.; VICENTINO, L. A. L.; FIDELI, R. R.; BARROS, H. B. Combinação de métodos paramétricos e não-paramétricos para estudo da estabilidade de cultivares de soja no Cerrado Tocantinense. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, p. 21-25, 2016.

CARMO, E. L.; BRAZ, G. B. P.; SIMON, G. A.; SILVA, A. G.; ROCHA, A. G. C. Desempenho agronômico da soja cultivada em diferentes épocas e distribuição de plantas. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, p. 61-69, 2018.

CARVALHO, N. S.; RODRIGUES, E. B. S.; SANTANA, T. S.; CANTANHEDE, L. A.; SOUSA, G. M.; SOUSA, R. A.; SILVA FILHO, F. M.; MATOS, R. R. S. S. Revisão: a importância da soja para o agronegócio brasileiro. In: SILVA-MATOS; R. R. S.; SILVA, A. L. V.; VIEIRA NETO, G. F. (org). **Fitotecnia, sistemas agrícolas ambientais e solo.** Paraná: Editora Atena, 2023. cap. 6, p. 52-60.

CHAGAS JUNIOR, A. F.; CHAGAS, L. F. B.; MARTINS, A. L. L.; COLONIA, B. S. O.; OLIVEIRA, R. S. Soybean productivity with *Trichoderma asperellum* seed treatment in different regions of the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.16, p. 1171, 2021.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira**: décimo segundo levantamento, setembro 2017, safra 2016/2017. Brasília. 2017.

CUADRA, S. V.; KIMBALL, B. A.; BOOTE, K. J.; SUYKER, A. E.; PICKERING, N. Energy balance in the DSSAT-CSM-CROPGRO model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 297, p. 1-17, 2021.

CUADRA, S. V.; ROCHA, R. P.; LLOPART, M. P.; VICTORIA, D. C.; ALMEIDA, I. R.; FARIAS, J. R. B. Impactos da correção de viés sobre projeções de mudanças climáticas aplicadas a simulações de rendimento de culturas. **Agrometeoros**, v. 26, p. 287-298, 2018.

DALL´AGNOL, A. **A Embrapa Soja no contexto do desenvolvimento da soja no Brasil: histórico e contribuições**. Brasília: EMBRAPA, 2016.

DIAS, L. C. P.; PIMENTA, F. M.; SANTOS, A. B.; COSTA, M. H.; LADLE, R. J. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. **Global Change Biology**, v. 22, p. 2887-2903, 2016.

DOKOOHAKI, H.; GHEYSARI, M.; MOUSAVI, S.; ZAND-PARSA, S.; MIGUEZ, F.; ARCHONTOULIS, S.; HOOGENBOOM, G. Coupling and testing a new soil water module in DSSAT CERES-Maize model for maize production under semi-arid condition. **Agricultural Water and Managment**, v. 163, p. 90-99. 2016.

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O. O. S. Principles of crop modeling and simulation: I. uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, v. 55, p. 46-50, 1998.

EGLI, D. B.; HATFIELD, J. L. Yield gaps and yield relationships in Central U.S. soybean productions systems. **Agronomy Journal**, v. 106, p. 560-566, 2014.

ELIAS, E. H.; FLYNN, R.; IDOWU, O. J.; REYES, J.; SANOGO, S.; SCHUTTE, B. J.; SMITH, R.; STEELE, C.; SUTHERLAND, C. Crop vulnerability to weather and climate risk: Analysis of interacting systems and adaptation efficacy for sustainable crop production. **Sustainability**, v. 11, p. 6619, 2019.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 2019. https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-ervico/6059/soja-brs-8980ipro. Acessado em 15 de Outubro de 2020.

EMBRAPA. EMBRAPA AGROINDÚSTRIA TROPICAL. **Soja: Tipo de Crescimento**. Brasília: EMBRAPA, 2021.

ERGO, V. V.; LASCANO, R.; VEJA, C. R. C.; PAROLA, R.; CARRERA, C. S. Heat and water stressed field-grown soybean: A multivariate study on the relationship between physiological-biochemical traits and yield. **Environmental and Experimental Botany**, v. 148, p. 1-11, 2018.

ESCHER, F.; WILKINSON, J. A economia política do complexo Soja-Carne Brasil-China. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 57, p. 656-678, 2019.

EULENSTEIN, F.; LANA, M.; SCHLINDWEIN, S.; SHEUDZHEN, A.; TAUSCHK, M.; BEHREND, A.; GUEVARA, E.; MEIRA, S. Trends of soybean yields under climate change scenarios. **Horticulturae**, v. 3, n. 1, p. 10, 2017.

FATTORI JUNIOR, I. M.; SILVA, E. H. F. M.; GONÇALVES, A. O.; MARIN, F. R. Umidade volumétrica do solo medida e estimada pelo modelo DSSAT/CROPGRO em cultivo de soja. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 02, p. 294-301, 2017.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Lowa State University of Science and Technology. 1977. p. 11

FERREIRA F. **Modelagem da produtividade de soja em função de variáveis meteorológicas no centro-sul do Paraná**. 2018. 56 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Guarapuava, Paraná, 2018.

HOOGENBOOM, G.; PORTER C. H.; BOOTE, K. J.; SHELIA, V.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; WHITE, J. W.; ASSENG, S.; LIZASO, J. I.; MORENO, L. P.; PAVAN, W.; OGOSHI, R.; HUNT, L. A.; TSUJI, G. Y.; JONES, J. W. **The DSSAT crop modeling ecosystem**. In: BOOTE, K. J. (org). **Advances in crop modeling for a sustainable agriculture.** Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing. 2019 a. p.173-216.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; HUNT, L. A.; SINGH, U.; LIZASO, J. I.; WHITE, J. W.; URYASEV, O.; OGOSHI, R.; KOO, J.; SHELIA, V.; TSUJI, G. Y. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6. DSSAT Foundation**, Prosser, Washington. 2015. Disponível em: <http://dssat.net.>. Acesso em: 21 ago. de 2023.

HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; SHELIA, V.; BOOTE, K. J.; SINGH, U.; WHITE, J. W.; HUNT, L. A.; OGOSHI, R.; LIZASO, J. I.; KOO, J.; ASSENG, S.; SINGELS, A.; MORENO, L. P.; JONES, J. W. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7.5.** DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA, 2019b. Disponível em: <http://dssat.net.>. Acesso em: 21 ago. 2023.

HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; SHELIA, V.; BOOTE, K. J.; SINGH, U.; WHITE, J. W.; PAVAN, W.; OLIVEIRA, F. A. A.; MORENO-CADENA, L. P.; LIZASO, J. I.; ASSENG, S.; PEQUENO, D. N. L.; KIMBALL, B. A.; ALDERMAN, P. D.; THORP, K. R.; JONES, M. R.; CUADRA, S. V.; VIANNA, M. S.; VILLALOBOS, F. J.; FERREIRA, T. B.; BATCHELOR, W. D.; KOO, J.; HUNT, L. A.; JONES, J. W. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.8 (DSSAT.net).** DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA. 2021. Disponível em: <http://dssat.net.>. Acesso em: 21 ago. 2023.

HOOGENBOOM, G.; WILKENSP, W.; TSUJI, G. Y. **DSSAT v3**. 4 ed. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii. 1999.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento sistemático da produção agrícola.** Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/piaui.>. Acesso em: 08 mai. 2023.

JONES, J. W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; BOOTE, K. J.; CONANT, R. T.; FOSTER, I.; GODFRAY, H. C.; HERRERO, M.; HOWITT, R. E.; JANSSEN, S.; KEATING, B. A.; MUNOZ-CARPENA, R.; PORTER, C. H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELER, T. R. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 240-254, 2017.

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, p. 235-265, 2003.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; WILKENS, P.W.; PORTER, C. H.; TSUJI. G. Y. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0**. Honolulu: University of Hawaii, 2010.

LI, Z. T.; YANG, J. Y.; DRURY, C. F.; HOOGENBOOM, G. Evaluation of the DSSAT-CSM for simulating yield and soil organic C and N of a long-term maize and wheat rotation experiment in the Loess Plateau of Northwestern China. **Agricultural Systems**, v.135, p. 90-104, 2015.

LIMA FILHO, A. F.; COELHO FILHO, M. A.; HEINEMANN, A. B. Calibração e avaliação do modelo CROPGRO para a cultura do feijão caupi no Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 1286-1293, 2013.

LUO, Q.; BANGE, M.; CLANCY, L. Cotton crop phenology in a new temperature regime. **Ecological Modelling**, v. 285, p. 22-29, 2014.

LUZ, J. A. A.; REIS, J. G. M.; FRANCO, E. A. P.; EULÁLIO NETO, M.; SOUSA, L. M.; COSTA, G. A. Evolução da produção de soja no Estado do Piauí em comparação aos principais produtores nacionais e regionais. **Revista FSA**, v. 19, p. 202-220, 2022.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Política Agrícola. **Portaria nº 116/2021.** Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-116-de-11-de-2021-319515885.>. Acesso em: 02 mai. 2023.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Política Agrícola. **Instrução Normativa SPA/MAPA Nº 1, de 21 de junho de 2022.** Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/documentos/InstruoNormativa_n_1_de_21_de_junho_de2022_V2.pdf.>. Acesso em: 17 mai. 2023.

MARIN, F. R. **Princípios de modelagem de sistemas agrícolas**. 2016. Disponível em: <Texto_Intro_Modelagem.pdf (usp.br)>. Acesso em: 21 ago. 2023.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y.; NEALE, C. M. U.; HITTARANJAN, R.; YANG, H. S. Water productivity benchmarks: The case of maize and soybean in Nebraska. **Agricultural Water Management**, v. 234, p. 106122, 2020.

MELO, A. C. A.; NOBRE JÚNIOR, A. A.; SILVA, F. A. M.; ABREU, L. M. Zoneamento de risco climático para cultivo da soja no Cerrado. **Pesquisas Agrárias e Ambientais**, v. 8, p. 26-36, 2020.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **The data was obtained from the POWER Project's. Geos 5.12.4 (FP-IT) 0.5 x 0.5 Degree Daily Averaged**. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/.>. Acesso em: 06 jul. 2023.

NASSIF, D. S. P.; MARIN, F. R.; PALLONE FILHO, W. J; RESENDE, R. S.; PELLEGRINO, G. Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 311-318, 2012.

NÓIA JÚNIOR, R. S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize succession in Brazil: Impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. **European Journal of Agronomy**, v. 103, p. 140-151, 2019.

OLIVEIRA, J. R.; SILVA, R. V.; YOKOO, S. C. A influência climática na cultura da soja nos municípios de Roncador e Boa Esperança – PR, dos anos de 2008 a 2017. *In*: XI ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 2019. PARANÁ. **Anais Eletrônicos** [...]. Maringá: UniCesumar, 2019.

OVANDO, G.; SAYAGO, S.; BOCCO, M. Evaluating accuracy of DSSAT model for soybean yield estimation using satellite weather data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 138, p. 208-217, 2018.

PHAM, Q. V.; NGUYEN, T. T. N.; VO, T. T. X.; LE, P. H.; NGUYEN, X. T. T.; DUONG, N. V.; LE, C. T. S. Applying the SIMPLE Crop Model to Assess Soybean (*Glicine max* (L.) Merr.) Biomass and Yield in Tropical Climate Variation. **Agronomy**, v. 13, p. 1180, 2023.

R CORE TEAM. Foundation for Statistical Computing Platform version 4.2.1 (2022-06-23 ucrt). "Funny-Looking Kid" Copyright (C) 2022. The R: x86_64-w64-mingw32/x64 (64-bit). Rotina: [> ###corrlacao com significancia####>> dados <- read.table("ftres_siglas.txt", h= T)> dados > library(metan) > corrl <-corr_coef (dados)> Plot(corrl)].

REIS, L.; SILVA, C. M. S.; BEZERRA, B.; MUTTI, P.; SPYRIDES, M. H.; SILVA, P.; MAGALHÃES, T. R. F.; RODRIGUES, D.; ANDRADE, L. Influence of climate variability on soybean yield in MATOPIBA, Brazil. **Atmosphere**, v. 11, p. 1-24, 2020.

RICHETTI, J.; JOHANN, J. A.; OPAZO, M. A. U. Crop modeling with less data: the FAO model for soybean yield estimation. **Engenharia Agrícola**, v. 41, p. 196-203, 2021.

RITCHIE, J. T. **Soil water balance and plant water stress**. *In:* G. Y. TSUJI, G.; HOOGENBOOM.; P. K. THORNTON. (eds). **Understanding Options for Agricultural Production.** Dordrecht, Netherlands: Academic Publishers, 1998. p. 41-54.

ROSENZWEIG, C.; ELLIOTT, J.; DERYNG, D.; RUANE, A. C.; MÜLLER, C.; ARNETH, A.; BOOTE, K. J.; FOLBERTH, C.; GLOTTER, M.; KHABAROV, N.; NEUMANN, K.; PIONTEK, F.; PUGH, T. A. M.; SCHMID, E.; STEHFEST, E.; YANG, H.; JONES, J. W. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of américa**, v.111, p. 3268-3273, 2014.

ROSENZWEIG, C.; JONES, J. W.; HATFIELD, J. L.; RUANE, A. C.; BOOTE, K. J.; THORBURN, P.; ANTLE, J. M.; NELSON, G. C.; PORTER, C.; JANSSEN, S.; ASSENG, S.; BASSO, B.; EWERT, F.; WALLACH, D.; BAIGORRIA, G.; WINTER, J. M. The agricultural model intercomparison and improvement project (AgMIP): protocols and pilot studies. **Agricultural and Forest Meteorololgy**, v. 170, p. 166-182, 2013.

SALMERÓN, M.; PURCELL, L. C. Simplifying the prediction of phenology with the DSSAT-ROPGRO-soybean model based on relative maturity group and determinacy. **Agricultural Systems**, v. 148, p. 178-187, 2016.

SALMERÓN, M.; PURCELL, L. C.; VORIES, E. D. SHANNON, G. Simulation of genotype-by-environment interactions on irrigated soybean yields in the U.S. Midsouth. **Agricultural Systems**, v. 150, p. 120-129, 2017.

SCIARRESI, C.; PROCTOR, C.; HARAMOTO, E. R.; LINDSEY, L. E.; CARMONA, G. I.; ELMORE, R.; EVERHART, S.; LOOKER, W.; GUZMAN, M. M.; MCMECHAN, J.; WEHRBEIN, J.; WERLE, R.; SALMERON, M. Evaluating short-season soybean management adaptations for cover crop rotations with a crop simulation model. **Field Crops Research**, v. 250, n. 5, p. 107734, 2020.

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soy: From planting to harvesting**, 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2015. 333 p.

SENA, C. C. R.; SILVA, G. C.; EVANGELISTA, Z. R.; NUNES, M. E.; PEGO, A. W. E. Atributos físico-hídricos de solos do cerrado. **Revista Agrotecnologia**, v. 12, p. 80-91, 2021.

SERAFIMA, M. E.; ZEVIANI, W. M.; ONO, F. B.; NEVES, L. G.; SILVA, B. M.; LAL, R. Reference values and soil quality in areas of high soybean yield in Cerrado region, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104362, 2019.

SHIMAKURA, S. E. **Correlação**. Paraná: Universidade Federal do Paraná: 2006. 71-78 p.

SILVA, E. H. F. M.; BOOTE, K. J.; HOOGENBOOM, G.; GONÇALVES, A. O.; ANDRADE JUNIOR, A. S.; MARIN, F. R. Performance of the CSM-CROPGRO-soybean in simulating soybean growth and development and the soil water balance for a tropical environment. **Agricultural Water Management**, v. 252, p. 0378-3774, 2021.

SILVA, E. H. F. M.; PEREIRA, R. A. A.; GONÇALVES, A. O.; BORDIGNON, A. J. Z.; MARIN, F. R. Simulação de produtividade futura de soja em Piracicaba-SP com base em projeções de mudanças climáticas. **Agrometeoros**, v. 25, p. 9-17, 2017.

SILVA, D. R. O.; AGUIAR, A. C. M.; BASSO, C. J.; CUTTI, L.; SORIANI, H. H. Impact of the competition duration on light and soil resources between soybean and volunteer corn. **Scientia Agraria**, v. 19, p. 78-85, 2018.

SILVA, V. P. R.; SILVA, R. A.; MACIEL, G. F.; SOUZA, E. P.; BRAGA, C. C.; HOLANDA, R. M. Soybean yield in the Matopiba region under climate changes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 8-14, 2020a.

SILVA, E. S.; CARVALHO, M. A. C.; DALLACORT, R. Cultivares de soja em função de elementos climáticos nos municípios de Tangará da Serra e Diamantino, MT. **Nativa**, v. 8, p. 157-164, 2020b.

SOUZA, P. J. O. P.; SANTOS, C. D. M.; SOUZA, E. B.; OLIVEIRA, E. C.; SANTOS, J. T. S. Impactos das mudanças climáticas na cultura da soja no Nordeste do estado do Pará. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, p. 2454-2467, 2018.

SOUZA, J. M. H.; CUADRA, S. V.; PINTO, L. B.; CASTRO, J. R.; ARAUJO, R.; ALMEIDA, I. R.; SILVA, S. D. A. Análise de sensibilidade dos coeficientes genéticos do modelo Canegro/DSSAT. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 2, p. 47-52, 2017.

TALACUECE, M. A. D.; JUSTINO, F. B.; RODRIGUES, R. A.; FLORES, M. E. P.; NASCIMENTO, J. G.; SANTOS, E. A. Modeling of soybean under present and future climates in Mozambique. **Climate**, v. 4, p. 31, 2016.

TEIXEIRA, W. W. R.; BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, M. F.; OLIVEIRA JUNIOR, A. Uncertainty assessment of soya bean yield gaps using DSSATCSM-CROPGRO-Soybean calibrated by cultivar maturity groups. **Journal Agronomy Crop Science**. v. 205, n. 5, p. 533-544, 2019.

TEIXEIRA, W. G.; VICTORIA, D. C.; BARROS, A. H. C.; LUMBRERAS, J. F.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, F. A. M.; LIMA, E. P.; BUENO FILHO, J. S. S.; MONTEIRO, J. E. B. A. **Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no Zoneamento Agrícola de Risco Climático**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 272).

TSUKAHARA, R. Y.; FONSECA, I. C. B.; SILVA, M. A. A.; KOCHINSKI, E. G.; PRESTES NETO, J.; SUYAMA, J. T. Produtividade de soja em consequência do atraso da colheita e de condições ambientais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 905-915, 2016.

VASCONCELLOS, M. C.; CORASSA, J. N.; PITTA, R. M.; ROLIM, G. G. Estratégias de controle de pragas em soja e suas implicações na comunidade de artrópodes e na rentabilidade da cultura. **Nativa,** v. 11, p. 28-43, 2023.

VIANNA, M. S.; SENTELHAS, P. C. Performance of DSSAT CSM-CANEGRO under operational conditions and its use in determining the ‘Saving irrigation’impact on sugarcane crop. **Sugar Tech**, v.18, p.75-86, 2016.

VIVAN, G. A.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X. Rendimento e rentabilidade das culturas da soja, milho e feijão cultivados sob condições de sequeiro. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, p. 2943-2950, 2015.

WESZ JUNIOR, V. J.; KATO, K.; LEÃO, A. R.; LEÃO, S. A.; LIMA, M. S. B. Dinâmicas recentes do agronegócio no Oeste do Pará (Brasil): expansão da soja e estruturação de corredores logísticos. **Mundo Agrário**, v. 22, p. 174-174, 2021.

WIJEWARDANA, C.; REDDY, K. R.; ALSAJRI, F. A.; IRBY, J. T.; KRUTZ, J.; GOLDEN, B. Quantifying soil moisture deficit effects on soybean yield and yield component distribution patterns. **Irrigation Science,** v. 36, p. 241–255, 2018.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 63, p. 1309-1313, 1982.

WINCK, J. E. M.; MARTIN, T. N.; PINTO, M. A. B.; BRUNING, L. A.; ARISMENDI, G. A. Spatial arrangement of plants on leaf growth and development and the yield potential of soybean. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, p. 913-922, 2020.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, p. 8390-8404, 2022.

YAN, W.; JIANG, W.; HAN. X.; HUA, W.; YANG, J.; LUO, P. Simulating and predicting crop yield and soil fertility under climate change with fertilizer management in northeast China based on the Decision Support System for Agrotechnology Transfer Model. **Sustainability**, v. 12, p. 2194, 2020.

YANG, J. M.; YANG, J. Y.; LIU, S.; HOOGENBOOM, G. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. **Agricultural Systems**, v. 127, p. 81-89, 2014.

ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; ROCHA, T. S. M.; ALBERTO, C. M.; BARTZ, A. C.; PAULA, G. M.; TOMIOZZO, R.; COSTA, L. C.; FENSTERSEIFER, C. A.; EDUARDO, L.; TAGLIAPIETRA, A. P. C.; WEBER, P. S.; BEXAIRA, K. P. Efeito do tipo de crescimento no desenvolvimento de cultivares modernas de soja após o início do florescimento no Rio Grande do Sul. **Bragantia**, v. 10, p. 1678-4499, 2016.